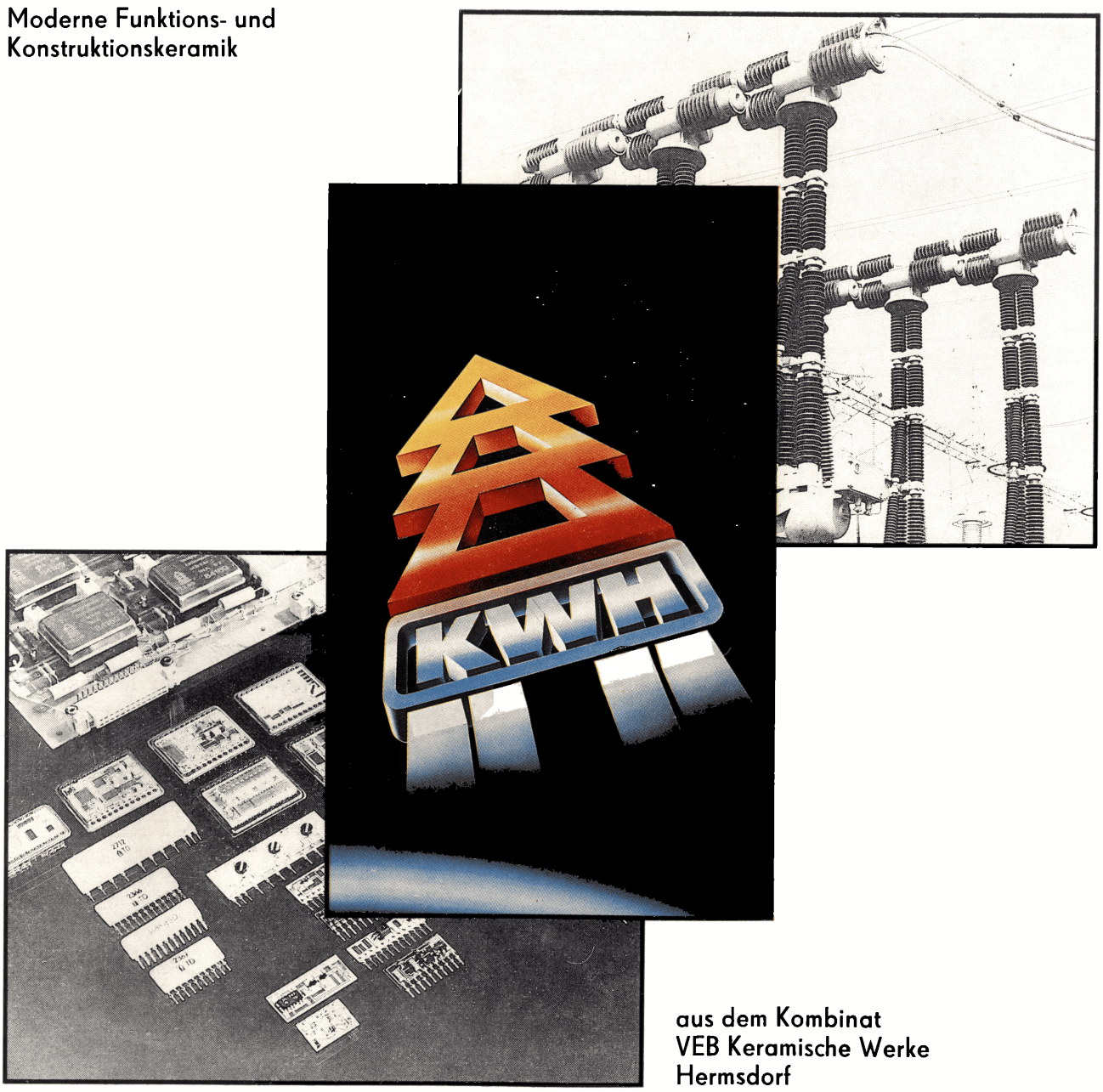
ELEKTRIE 7|88

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399

Moderne Funktions- und
Konstruktionskeramik



aus dem Kombinat
VEB Keramische Werke
Hermsdorf

0120249

Auslieferung in diesen Tagen

Grundlagen der elektrischen Meßtechnik

Von Prof. Dr. sc. techn. Werner Richter
2., bearbeitete Auflage. 308 Seiten, 322 Bilder, 38 Tafeln, Leinen, DDR 19,– M, Ausland 32,– DM.
Bestellangaben: 5538381/Richter, Meßtechnik

Ausgelöst durch die Entwicklung der Halbleitertechnologie werden der Mikroelektronik ständig neue Anwendungsmöglichkeiten erschlossen, die heute vom rechnergestützten Entwurf über Konstruktion und Fertigungssteuerung bis hin zur rechnergestützten Qualitätssicherung reichen und schließlich in weitgehend bedienarme Produktionsprozesse münden werden. Weil dabei die Signalgewinnung, -übertragung und -nutzung zunehmend rein elektrisch erfolgt, wächst auch die Bedeutung der elektrischen Meßtechnik für alle Anwenderbereiche elektronischer Funktionseinheiten.
Eine Darstellung der Grundlagen der elektrischen Meßtechnik muß daher derartige Tendenzen verstärkt berücksichtigen. Das jetzt erscheinende Buch enthält neben einer gründlichen Beschreibung von Kenngrößen und Kennfunktionen für Meßeinrichtungen sowie der gesamten Fehlerproblematik vor allem die für die moderne elektronische Meßtechnik typischen Funktionseinheiten, Meßgeräte und -systeme bis hin zu Sensoren und mikroprozessorgesteuerten Meßeinrichtungen. Ebenso wird auf die sich daraus ergebenden Änderungen der Meßverfahren und -strategien eingegangen. Die zweite Auflage ist aktualisiert worden.
Hervorzuheben ist die große Praxisnähe, die durch viele Beispiele wirkungsvoll unterstrichen wird. Diese Beispiele erleichtern den Zugang zum Fachgebiet und ermöglichen die Verwendung des Buches als studienbegleitende Literatur in der Aus- und Weiterbildung.
Studierende technischer Fachrichtungen werden dieses Buch ebenso mit Gewinn durcharbeiten können wie in der Praxis stehende Ingenieure, die sich mit den modernen Grundlagen der elektrischen Meßtechnik und ihrer Nutzung zu befassen haben.

Taschenbuch Elektrotechnik

Band 6: Systeme der Elektroenergietechnik

Herausgegeben von Prof. Dr. sc. techn. Dr. techn. h.c. Eugen Philippow
2., unveränderte Auflage. 916 Seiten, 785 Bilder, 248 Tafeln, Kunstleder, DDR 30,– M, Ausland 53,– DM.
Bestellangaben: 5529290/Tb. Elektro 6

Das Taschenbuch Elektrotechnik ist das umfangreichste Nachschlagewerk über die gesamte Elektrotechnik und ihre Grenzgebiete. Es enthält grundsätzliche Aussagen in knapper, redundanzarmer Darstellung sowie eine Fülle quantitativer Angaben in Form von Tabellen, Diagrammen und Zeichnungen. Der Stoff ist so dargestellt, daß der Nutzer unmittelbar damit arbeiten kann, ohne noch weitere Unterlagen heranziehen zu müssen. Standards des Auslands und internationaler Organisationen wurden im notwendigen Umfang berücksichtigt.
Hauptabschnitte Band 6:
Elektrische Energietechnik · Hochspannungsisoliertechnik · Elektrowärme · Lichttechnik · Elektrochemie.

Im Fachbuchhandel erhältlich

Zur Zeit noch lieferbar:
Band 5: Elemente und Baugruppen der Elektroenergietechnik
2., unveränderte Auflage. 972 Seiten, 920 Bilder, 285 Tafeln, Kunstleder, DDR 30,— M, Ausland 53,— DM. Bestellangaben: 5528263/Tb. Elektro 5
Hauptabschnitte: Elektrische Maschinen · Elektrische Antriebe · Elektrische Apparate · Meß-, Schutz- und Steuereinrichtungen der Elektroenergietechnik · Leistungselektronik.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

7|88 ELEKTRIE

42. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013-5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Goldene Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Inhalt

Seite

Aktuelle Information 242

Fischer, W.
Technische Keramik des Kombinats VEB Keramische Werke Hermsdorf — ein vielseitig einsetzbarer Werkstoff 243

Fachaufsätze

Gesemann, R.; Gebhardt, G.; Stupin, P.
Erprobung und Einsatzprobleme bei Keramikschichtkommutatoren. Teil 1 245

Gesemann, R.; Gebhardt, G.; Müller, F.; Stupin, P.
Erprobung und Einsatzprobleme bei Keramikschichtkommutatoren. Teil 2 248

Hildebrand, N.; Lippschus, A.; Roseburg, D.
Ummagnetisierungsverluste weichmagnetischer Kerne bei Mittelfrequenz 251

Küttner, H.
Weiterentwicklung der Niederspannungs-Isolationskoordination durch Einbeziehung einer statistischen Betrachtungsweise 253

Buchholz, B.; Kreuzer, E.; Mahnert, H.; Thämelt, G.; Tscheschner, Chr.
Methoden der Zuverlässigkeitssicherung integrierter mikroelektronischer Leitsysteme für VUW 110 kV 256

Bär, G.; Weber, G.
Qualimetrische Eigenschaftsbewertung von Edelmetall-Kontaktwerkstoffen und -Halbzeugen für Schwachstromanwendungen. Teil 2 260

Dobrogowski, J.; Kolaczkowski, Z.; Nawrowski, R.; Rybski, A.
Zum Polaritätseffekt der Elektroden in kurzen Luft- und Vakuumstrecken mit ungleichförmiger Feldverteilung 264

Blumschein, E.
Dualitätsgerechte Begriffe für die Leistungselektronik 267

Kaczmarek, T.; Deskur, J.
Regelung eines Stromrichtermotors an der Wechselrichtertrittgrenze 270

Umschau

Fachtagungen 275

Patente 277

Bücher 279

Titelbild

Das „Tridelta" als Warenzeichen des Kombinates VEB Keramische Werke Hermsdorf repräsentiert maßgeblich den Fortschritt für moderne Werkstoffe und Bauelemente der technischen Keramik.
Die Einsatzgebiete dieser Funktionskeramik reichen von der Mikroelektronik bis zur Hochspannungstechnik in allen Bereichen der Volkswirtschaft.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

AKTUELLE INFORMATION

Computerintegrierte Systeme für die industrielle Elektroenergietechnik

Wissenschaftliche Konferenz 1989 der Sektion Elektroenergieanlagen an der Technischen Hochschule Leipzig

Zeit: 26. bis 28. April 1989
Ort: TH Leipzig
Veranstalter: TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

Inhaltliche Schwerpunkte

- Elektrosicherheit und Zuverlässigkeit
  - — Qualitätsbewertung
  - — Quantitative und qualitative Bewertung — mathematische Modellierung
  - — Sicherheitstechnische Mittel (Spannungswarngeräte für ortsveränderliche Arbeitsmaschinen)
- Rechnerintegrierte Elektroantriebssysteme
  - — Hardware und Software für Steuerungen und Regelungen elektrischer Antriebe
  - — Rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung der Steuerung und Regelung elektrischer Antriebssysteme
  - — Struktur- und Parameteridentifikation bei elektrischen Antriebssystemen
- Konstruktion und Herstellung von Elektroenergieanlagen
  - — Rechnerunterstützte Prozesse bei der Konstruktion und Herstellung von Elektroenergieanlagen
  - — Aspekte der perspektivischen Gestaltung von Elektroenergieanlagen und ihrer Betriebsmittel
  - — Prüf- und Meßtechnik im Elektroenergieanlagenbau
  - — Theoretische Erkenntnisse und praktische Anwendungsmöglichkeiten der elektrischen Verbindungs- und Anschlußtechnik
- Entwurf und Betrieb von Netzen in Industrie und Kraftwerken
  - — Entwurf von IEES — Abnehmeranalyse, Stabilisierung
  - — Betriebsvorgänge in IEES
    - · Computersimulation
    - · Experimentelle Untersuchung
    - · Spezielle elektrotechnische Phänomene
- CAD- und Prozeßleittechnik — Software für Elektroenergieanlagen
  - — Expertensystementwicklung, Arbeitsweisen im Expertensystemmodus, Aufbau und Pflege von Wissensbasen, Expertensysteme
  - — Konzeption für computerintegrierte Systeme, strukturierungskomplexer Prozesse, Objekt-Produktionsmodelle für EEA, Prozeßmodelle für CAD-Beschreibungs- und Entwurfssprachen
  - — Softwareentwurf für Prozeßleittechniksysteme, Software für Warten und prozeßnahe Ebenen, Analyse und Simulation Prozeßleittechnik — Software
  - — Applikation im Projektierungsbereich und für die Prozeßleittechnik von Elektroenergieanlagen

Anfragen

Technische Hochschule Leipzig
Sektion Elektroenergieanlagen (WK '89)
Postfach 66
Leipzig
7030

S. Altmann, Leipzig EA 2795

Forschung und Ausbildung für die Energiewirtschaft — 20 Jahre Technische Hochschule Zittau

IX. Wissenschaftliche Konferenz für Energiewirtschaft

Zeit: 7. bis 9. Juni 1989
Ort: TH Zittau
Veranstalter: TH Zittau

Inhaltliche Schwerpunkte

- Methoden und Verfahren zur kurz-, mittel- und langfristigen Gestaltung von Energieversorgungssystemen
  - — Leitung, Planung und Ökonomie der Entwicklung der Gesamtenergiewirtschaft und ihrer Teilsysteme
  - — Leitung und Planung von Struktureinheiten, der Modernisierung und Rekonstruktion von Energieumwandlungs- und Übertragungsanlagen
- Kohle- und Kernkraftwerke
  - — Verbrennung und Senkung der Schadstoffemission
  - — Kernkraftwerkstechnik
  - — Kraftwerkstechnik
- Stand und Perspektive der Hauptausrüstungen für Elektroenergie-Verteilungsanlagen
  - — Anforderungen an Mittelspannungs-Schaltanlagen
  - — Technische Konzeption moderner Mittelspannungs-Schaltanlagen für hohe und niedrige Energiedichten
  - — Technische Konzeption moderner Niederspannungs-Schaltanlagen und deren Komponenten für einen breiten Anwendungsbereich
- Rationelle Energienutzung und Umweltschutz
  - — Niedertemperatur-Energienutzung
  - — Energieeinsparung durch Intensivierung
  - — CAD/CAM-Lösungen für den rationellen Energieeinsatz
- Instandhaltung und Technische Diagnostik
  - — Systeme der Anlagenüberwachung und Technischen Diagnostik/Expertsysteme
  - — Erhaltungs- und Rekonstruktionsstrategie für Energieanlagen
  - — Einsatz der Datenverarbeitung in der Instandhaltung
- Automatisierung energetischer Prozesse
  - — Kraftwerksautomatisierung
  - — Automatisierung in Elektroenergiesystemen
- Energie und Gesellschaft
  - — Das Energieproblem, seine verschiedenen weltanschaulichen Reflexionen und Lösungskonzeptionen sowie seine Verflechtung mit dem Problem der Friedenssicherung und dem Umweltproblem
  - — Energieökonomie in der umfassenden Intensivierung; reproduktionstheoretische und volkswirtschaftlich-praktische Probleme und Lösungen
  - — Historische und gegenwärtige Fragen der energiewirtschaftlichen Entwicklung
- Wissenschaftliche Rahmenveranstaltungen
  - — X. Zittauer Kernenergiegespräch
  - — Errichtung von Kernkraftwerken
  - — Rationelle Energieanwendung
  - — Regimesteuerung von Elektroenergieversorgungsnetzen
  - — Entwicklungstendenzen in der Verrechnungstechnik für Elektroenergie
  - — Geschichtsschreibung in der Energiewirtschaft

Anfragen

Technische Hochschule Zittau
Theodor-Körner-Allee 16
Zittau
8800
Tel.: Zittau 610
Telex: 284240

G. Schumann, Zittau EA 2798

System Modelling and Optimization

14. IFIP-Konferenz

Zeit: 3. bis 7. Juli 1989
Ort: Leipzig
Veranstalter: Sektion Mathematik und Informatik der TH Leipzig mit Unterstützung der Akademie der Wissenschaften der DDR und der Mathematischen Gesellschaft der DDR

Inhaltliche Schwerpunkte

- — Optimale Steuerung
- — Modellierung und Optimierung stochastischer Systeme
- — Verteilte Systeme
- — Lineare und nichtlineare Optimierung
- — Ganzzahlige Optimierung und Optimierung in Netzwerken
- — Diskrete Optimierung
- — Leistungsoptimierung von Rechnerverbundsystemen
- — Optimierungssoftware
- — Optimierung strukturierter Systeme
- — Anwendungen in der Wirtschaft, im Ingenieurwesen, in der Industrie, im Energiewesen, Transport und Verkehrswesen, in der Biomedizin, im Umweltschutz und in den Ausbildungssystemen

Es besteht die Möglichkeit, während der Konferenz Software-Entwicklungen vorzuführen.

Im internationalen Programmkomitee arbeiten u.a. mit: *A. V. Balakrishnan* (USA); *R. E. Burkhard* (Österreich); *J. Dolezal* (ČSSR); *Y. Evtushenko* (UdSSR); *J. Guddat* (DDR); *M. Iri* (Japan); *P. Kall* (Schweiz); *R. Kluge* (DDR); *J. L. Lions* (Frankreich); *M. Lucertini* (Italien/Vorsitzender); *K. Malanowski* (VR Polen); *M. Padberg* (USA); *M. J. D. Powell* (Großbritannien); *J. Szeleszan* (Ungarische VR); *H. Scolnik* (Argentinien); *B. Sendov* (Bulgarien); *J. Stoer* (BRD); *P. Thoft-Christensen* (Dänemark); *J. Wessels* (Niederlande); *H. Zhou* (VR China).

Anfragen

Technische Hochschule Leipzig
Sektion Mathematik und Informatik
Organisationskomitee
Postfach 66
Leipzig
7030

H.-J. Sebastian, Leipzig EA 2801

Technische Keramik des Kombinates VEB Keramische Werke Hermsdorf – ein vielseitig einsetzbarer Werkstoff

Von
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer
Fachdirektor für Keramik
im Zentrum für Forschung
und Technologie des
Kombinates
VEB Keramische Werke Hermsdorf

Die Keramik, heute profilbestimmend für das Kombinat VEB KWH, hat in der Geschichte der Menschheit schon immer eine wichtige Rolle gespielt. Ihre Herstellungstechnologie für Gebrauchsgegenstände läßt sich bis in die mittlere Steinzeit zurückverfolgen. Allerdings war von alters her die Festigkeit das nahezu alleinige Synonym für Qualität. Die keramischen Ausgangsmaterialien fand man in der Natur als Lehm, Ton, Kaolin, Quarz und Feldspat.

Technische Einsatzzwecke wurden erstmals in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts durch Elektroporzellane für Isolierzwecke erschlossen.

Inzwischen hat sich die Entwicklung und Produktion technischer Keramik von der Empirie zu einer auf fundierten wissenschaftlichen Grundlagen beruhenden Werkstoff- und Technologiedisziplin herausgebildet.

Exakte Entwicklungsarbeit führte in den letzten 40 Jahren zu einer „Renaissance" der keramischen Herstellungsverfahren — von der Rohstoff- und Versatzaufbereitung über Formgebungstechnologien bis hin zur thermischen Behandlung im festen Zustand, dem Sintern.

In der Keramik dominieren gegenwärtig neben höchsten mechanischen Festigkeiten eine Vielzahl chemischer, thermischer, elektrischer, magnetischer und optischer Eigenschaften, deren Wirkprinzipien und Anwendungsmöglichkeiten die wissenschaftlichen Aufgabenstellungen zur Entwicklung und Produktion immer neuer technischer Keramikwerkstoffe einschließlich ihrer nur noch synthetisch zu gewinnenden Ausgangsmaterialien gleichermaßen bestimmen.

Die logische Konsequenz einer auch international intensiv betriebenen Forschungsarbeit auf dem Gebiet anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe erweiterte den gegenwärtig erreichten Erkenntnisstand zu neuen Struktur-Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen der technischen Keramik beträchtlich. Schon jetzt steht ein umfangreiches Sortiment neuer Funktionskeramiken, gekennzeichnet durch besondere piezo- und dielektrische, magnetische, elektrisch halbleitende, isolierende, aber auch optische Eigenschaften mit bedeutenden Anwendungsmöglichkeiten auf allen Gebieten der Elektrotechnik/Elektronik bereit.

Neue Konstruktionskeramiken bieten hohe mechanische Festigkeit, ausgezeichnetes Verschleißverhalten, große Härte und besondere Korrosionsbeständigkeit auf vielen Einsatzgebieten des Kraft- und Arbeitsmaschinenbaus, der Energieumwandlung sowie der chemischen und Konsumgüterindustrie.

Die Tafel gibt einen Überblick über die Werkstoffbasis wichtiger Eigenschaften und ausgewählte Anwendungsbeispiele der technischen Keramik (s. S. 244).

Mit den Beschlüssen des XI. Parteitages der SED ist die ökonomische Strategie der DDR mit Blick auf das Jahr 2000 in eine neue Etappe eingetreten, um neue wissenschaftlich-technische Erkenntnisse durch Schlüsseltechnologien schnell produktionswirksam zu machen.

In diesen volkswirtschaftlich bedeutenden und in enger Wechselwirkung zueinander stehenden Schlüsseltechnologien, wie der Mikroelektronik, der Rechentechnik, CAD/CAM, der automatisierten Fertigung, der Biotechnologie, Energieerzeugung und Lasertechnik gehört uneingeschränkt die Entwicklung neuer Werkstoffe, zu denen vorrangig die technische Keramik zu zählen ist.

Moderne Hochtechnologien sind heute ohne technische Keramik schon nicht mehr denkbar. Die keramische Technologie ihrerseits ist aber ebenso von anderen Schlüsseltechnologien abhängig, wenn sie nichtmetallisch-anorganische Keramikwerkstoffe und -verbunde mit neuen bzw. verbesserten Eigenschaften kostengünstig und mit hohem Veredlungsgrad durch einheimische, konfektionierte Rohstoffe für alle Zweige der Volkswirtschaft bereitstellen soll.

Neue Funktions- und Konstruktionskeramiken sind im Rahmen der ökonomischen Strategie der DDR eine echte Alternative angesichts der sich verknappenden Rohstoff- und Energieressourcen gegenüber bisher eingesetzten Werkstoffen. Sie ermöglichen zum Teil völlig neue Gebrauchswerte durch „maßgeschneiderte" Eigenschaften, z. B.

- als Träger- und Verschlußmaterialien mikroelektronischer Schaltkreise in Form von Substraten und Hermetikgehäusen
- als Werkstoffe miniaturisierter elektronischer passiver Bauelemente mit Regel- und Schutzfunktionen
- als Sensorkeramik zur Erfassung physikalisch-technischer Größen, wie Druck, Schwingung, Feuchte, Temperatur, Gaskonzentration und anderes mehr zur Prozeßautomatisierung und -optimierung
- als neue keramische Magnetwerkstoffe der Audio-, Video- und Digitalspeichertechnik, für die Nachrichtenübertragung und die elektrische Antriebstechnik
- als transparente Keramik für Brennerrohre der energiesparenden Lichttechnik und UV-lichtdurchlässige spezielle mikroelektronische Gehäusefenster.

Ständig zunehmende Bedeutung erlangen keramische Konstruktionswerkstoffe

- als Verschleißteile höchster Lebensdauer unter hohen Temperaturen im Maschinen- und Anlagenbau, für einen verbesserten Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung und als Katalysatorträger zur Schadstoffbeseitigung
- als Implantat- und Dentalkeramik der Humanmedizin mit besonderen körperverträglichen Eigenschaften
- als thermisch beständige und isolierende Wärmekeramik zur Gewährleistung von Hochtemperaturprozessen.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklungsarbeit und eine sichere Produktion von technischen Keramikerzeugnissen ist die langfristig gesicherte, qualitätsgerechte Bereitstellung der erforderlichen synthetischen und auf den Einsatzzweck zugeschnittenen Rohstoffe hoher Chargenkonstanz, denn der Rohstoff entscheidet über die Werkstoffqualität. Deshalb lautet der wissenschaftliche Auftrag des XI. Parteitages der SED zu einer solchen Zielstellung, alle in einheimischen Ausgangsmaterialien enthaltenen Komponenten zu erschließen und der Volkswirtschaft zur Verfügung zu stellen. Daraus leitet sich eine notwendige Erweiterung der bisherigen werkstoff- und erzeugnisorientierten keramischen Entwicklung auf das Gebiet der Pulverforschung ab. Das betrifft insbesondere Verfahren der Synthese zweckoptimierter Pulver im Hinblick auf hohe Reinheit, Korngröße, -form und -verteilung sowie deren reak-

Tafel 1. Einteilung der technischen Keramik nach ihren Materialeigenschaften

Hauptgruppe	Rohstoff- bzw. Werkstoffbasis	Untergruppe	Wesentliche Eigenschaften	Erzeugnisse (Auswahl)
Elektrokeramik	Al_2O_3, BeO, ALN, MgO, SiC, HS- und NS-Porzellan	Passive Elektrokeramik	elektrisch isolierend	Isolatoren, Zündkerzen, Substrate, Gehäuse, Heizleiterträger
	TiO_2, Pb_3O_4, $BaCO_3$, $SrCO_2$, $-Al_2O_3$, ZrO_2, ThO_2, NiO, Mn_2O_3, Fe_2O_3, ZnO, SiC, CuO, CoO, PB (Ti, Zr) O_3	Aktive Elektrokeramik	dielektrisch ionenleitend, halbleitend, piezoelektrisch	Kondensatoren, Festelektrolyte, PTC- und NTC-Thermistoren, Varistoren, el.-mech. Wandler, Heizleiter/Widerstände, Kraft-, Beschleunigungssensoren
Magnetokeramik	$MeO \cdot Fe_2O_3$	Weichmagnete	leicht ummagnetisierbar	Spulenkerne, Speichermedien
	BaO, $Sr \cdot 6\,Fe_2O_3$	Dauermagnete	hohe magnetische Energiedichte	Motorsegmente, Lautsprechersysteme
Optokeramik	Al_2O_3, MgO	Passive Optokeramik	transparent	Brennerrohre, optische Fenster
	(Pb, La) (Ti, Zr) O_3 $ThO_2-Y_2O_3$	Aktive Optokeramik	optoelektrisch	Lasermaterial, elektrooptische Wandler
Mechanokeramik	Al_2O_3, ZrO_2, Al_2TiO_5, Si_3N_4, SiC, B_4C, BN (kub) TiC, TiB_2	Motorenkeramik, Maschinenbaukeramik, Schneidkeramik	mechanisch fest, verschleißfest	Auskleidungen, Verschleißteile, Gleitringe, Dichtungsscheiben, Kugellager, Düsen, Schneidplatten
Chemokeramik	Al_2O_3, Si_3N_4, SiC, Hartporzellan	Chemotechnische Keramik	chemisch beständig	Pumpen, Ventile, Filter
	2MgO, 2 Al_2O_3, 5 SiO_2, SnO_2, ZnO, $MgCr_2O_4-TiO_2$	Aktive Chemokeramik	chemisch aktiv	Katalysatoren und -träger, Gas- und Feuchtesensoren
Biokeramik	Al_2O_3, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ Glaskeramik	Implantatkeramik Dentalkeramik	biokompatibel mechanisch fest	Implantate Kieferimplantate
Thermokeramik	Al_2O_3, MgO, ZrO_2, SiC, Al_2TiO_5, Si_3N_4	Konstr.-thermokeramik, Isolierthermokeramik	thermisch beständig thermisch isolierend	Heizelemente, Brennhilfsmittel, Schutzrohre Isoliermassen und -steine
Reaktorkeramik	UC, SiC, B_4C, UO_2		spezielle nuklear-technische Eigenschaften	Kernbrennstoffe, Absorbermaterial

tives Verhalten. Während ein Teil der in der Tafel aufgeführten Ausgangsstoffe in reiner Form zum Erzeugnis weiterverarbeitet werden kann, reagieren Ausgangskomponenten aufbereiteter Gemische (Versätze) unter definierten Sinterbedingungen auch zu neuen eigenschaftsbestimmenden Verbindungen. Wieder andere Komponenten stimulieren die keramischen Eigenschaften als Dotierungen oft mit Konzentrationen noch weit unter einem mol-% und können Eigenschaften (z.B. die elektrische Leitfähigkeit) über mehrere Zehnerpotenzen verändern.

Fast ohne Ausnahme lassen sich deshalb noch im Endprodukt die Eigenschaften der Rohstoffe und die Herstellungsbedingungen an der erzielten Erzeugnisqualität wiedererkennen.

Gleichzeitig mit den Rohstoffeigenschaften ist die erzeugnisspezifische Herstellungstechnologie mit den Erzeugniseigenschaften der technischen Keramik untrennbar verknüpft.

Neue Formgebungsverfahren durch isostatisches Pressen, Spritzgießen, Foliengießen bzw. -walzen, Extrudieren und Strangziehen, die Plasmaspritztechnik sowie neue Metallisierungs- und Oberflächenbearbeitungstechnologien bestimmen die Erzeugnisqualität und Zuverlässigkeit der technischen Keramik.

Forderungen nach modernsten automatisierten Aufbereitungs-, Formgebungs-, Sinter- und Endbearbeitungsprozessen bedürfen einer ständigen wissenschaftlichen Durchdringung des gesamten Reproduktionsprozesses. Ausgehend von den gegenwärtig erzielbaren Eigenschaften technischer Keramik und der volkswirtschaftlichen Bedarfsentwicklung, konzentriert sich das Kombinat VEB Keramische Werke Hermsdorf auf folgende Erzeugnislinien der technischen Keramik:

- Magnetokeramik
- oxidische Funktions- und Konstruktionskeramik
- keramische Halbleiter- und piezokeramische Bauelemente
- Sensorkeramik
- Katalysatorträgerkeramik.

Das bedeutet für Magnetwerkstoffe die Entwicklung und Produktion

- anisotroper Hartferrite für Roboter- und Kleinstmotoren, für Datenverarbeitungsanlagen und Lautsprechermagnetsysteme
- von Weichferriten für Schaltnetzteile, elektronische Vorschaltgeräte und Bauelemente der Hochfrequenztechnik
- hochwertiger Konsumgüter unter anderem durch miniaturisierte Lösungen für Kopfhörer.

Im Mittelpunkt der Oxidkeramik stehen

- hermetische Keramikgehäuse und Substrate der Mikroelektronik
- optokeramische Bauelemente der Lichttechnik und Mikroelektronik
- biokeramische Hüftgelenkprothesen und Dentalimplantate der Humanmedizin
- metallisierte Keramik und keramische Bondwerkzeuge der Elektrotechnik und Mikroelektronik.

Die Entwicklung und das Sortiment Keramische Bauelemente umfaßt

- selbstregelnde Heizkeramik für Einsatztemperaturen bis 300 °C
- Varistorkeramik für eine neue Überspannungsableitergeneration im Hoch-, Mittel- und Niederspannungsbereich
- keramische temperaturabhängige Widerstände (Thermistoren) mit positiven und negativen Temperaturkoeffizienten für die Regelungs- und Steuerungstechnik
- neue piezokeramische Erzeugnisse der elektromechanischen Energieumwandlung für Leistungsschallanwendung und Elektroakustik.

Keramische Sensoren bieten Einsatzmöglichkeiten als

- elektronenleitende Halbleiterkeramiken zur Temperaturmessung und -regelung
- ionenleitende Festelektrolyte zur Sauerstoffmessung in Schmelzen und Abgasen
- piezoelektrische Drucksensoren für Stellantriebe und Positionierelemente der Automatisierungstechnik
- Sensorelemente der Ultraschalldiagnose in der Medizintechnik.

Keramische Katalysatorträger werden zur Verhinderung von Schadstoffemissionen und als Voraussetzung für eine effektive katalytische und thermische Nachverbrennung entwickelt.

Das Kombinat VEB Keramische Werke Hermsdorf hat mit seinem Zentrum für Forschung und Technologie eine leistungsfähige Forschungseinrichtung zur Sicherung des erforderlichen wissenschaftlich-technischen Vorlaufs auf dem Gebiet der neuen technischen Keramik.

Gemeinsam mit wissenschaftlichen Einrichtungen der Akademie der Wissenschaften und des Hoch- und Fachschulwesens der DDR, mit anderen Kombinaten der chemischen Industrie und des Maschinenbaus sowie im Rahmen des RGW-Komplexprogrammes organisiert das KKWH seinen Forschungsvorlauf bis zum Jahre 2000 und darüber hinaus. Damit vollzieht sich gegenwärtig eine technische Entwicklung, in deren Verlauf das Kombinat VEB Keramische Werke Hermsdorf alle Zweige der Volkswirtschaft zuverlässig mit modernen, energie- und materialökonomisch vorteilhaften, hochveredelten Keramikwerkstoffen und -bauelementen versorgen wird.

EA 2809

Erprobung und Einsatzprobleme bei Keramikschichtkommutatoren. Teil 1

R. Gesemann, KDT; G. Gebhardt, KDT, Mittweida;
P. Stupin, KDT, Dresden

Mitteilung aus der Ingenieurhochschule Mittweida und dem VEB Elektromaschinenbau Dresden

In [1] wurde über die Entwicklung von Keramikschichtkommutatoren berichtet.
Auswahl und Prüfung von Kontaktsystemen für Kleinstmaschinen erfordern neben den Einzelaufgaben zur Konstruktion, Technologie oder Materialauswahl für die jeweiligen Kontakte (Kommutatorlamellen oder Schleifbürsten) auch grundsätzliche Überlegungen zur Erprobung verschiedener Lösungsvarianten, da das Ergebnis stets in besonderer Weise der experimentellen Bestätigung bedarf. Der Mechanismus des Stromüberganges bei Gleitkontakten ist zwar prinzipiell bekannt, es existieren auch qualitative Aussagen über das Verhalten verschiedener Materialkombinationen, jedoch können Belastbarkeit, zu erwartender Verschleiß oder Alterungsverhalten wegen der Vielzahl von Einflüssen auf das Kontaktsystem nicht in einfacher Weise formelmäßig erfaßt werden.[1])
Wesentliche Beanspruchungen und Einflußgrößen auf das Kontaktsystem sind:

— mechanische Reibung (gegeben durch Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators, Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktpartner, Andruckkräfte der Bürsten)
— thermische Beanspruchung (neben der Umgebungstemperatur am Kontaktsystem im wesentlichen durch die Stromdichte in den Kontaktteilen hervorgerufen; die Erwärmung durch die mechanische Reibung der Kontakte aufeinander ist gewöhnlich von untergeordneter Bedeutung)
— Korrosion und Oxydation (durch umgebende Atmosphäre, Temperatur, Schmiermittel bzw. Fremdschichten und die Wirkung des elektrischen Stromes selbst)
— elektroerosive Beanspruchung (Abbrand der Kontakte durch Lichtbögen; Einfluß hierauf haben die beim Abschalten umgesetzten Energien sowie die Häufigkeit der Schaltungen, die durch den Oberflächenzustand der Gleitkontakte, die Motordrehzahl und das Prellen bzw. Schwingen der Bürsten wesentlich mitbestimmt werden).

Aus allem ergibt sich, daß die Prüfungen zur Auswahl von Kontaktmaterialien oder -systemen in mehreren Schritten bei definierten Beanspruchungen, die eine Vergleichbarkeit ermöglichen, durchzuführen sind. Es ist zweckmäßig, in

— Prüfungen zur Vorauswahl der Materialien
— Anwendungserprobungen im konkreten Einsatzfall
— Prüfungen zur Ermittlung von Beanspruchungsgrenzen

zu gliedern.
Wegen ihres andersgearteten Aufbaus gegenüber herkömmlichen Systemen ergeben sich bei Keramikschichtkommutatoren besondere Einsatzprobleme. Sie liegen nicht nur in einer gewissen Begrenzung der Belastbarkeit, sondern vor allem in den Besonderheiten der Montage- und Anschlußtechnik.

1. Prüfungen zur Auswahl von Schichtsystemen

Die Vorauswahl von Kontaktmaterialien kann in Motorettentests erfolgen. Das heißt, nur die für die Funktion des Systems wesentlichen Elemente werden benutzt und die wichtigsten Betriebskennwerte — Belastungsstrom und Drehzahl — entsprechend dem späteren Einsatzfall vorgegeben.

Prof. Dr. sc. techn. *Renate Gesemann* ist ordentlicher Professor; Dr.-Ing. *Gerhard Gebhardt* ist Assistent an der Ingenieurhochschule Mittweida. Dr.-Ing. *Peter Stupin* ist Abteilungsleiter im VEB Elektromaschinenbau Dresden.

[1]) Im Heft 8 werden zum 8. Symposium Elektromaschinenbau Probleme der Herstellung und des Einsatzes von Kleinmotoren vorgestellt.
Die Redaktion

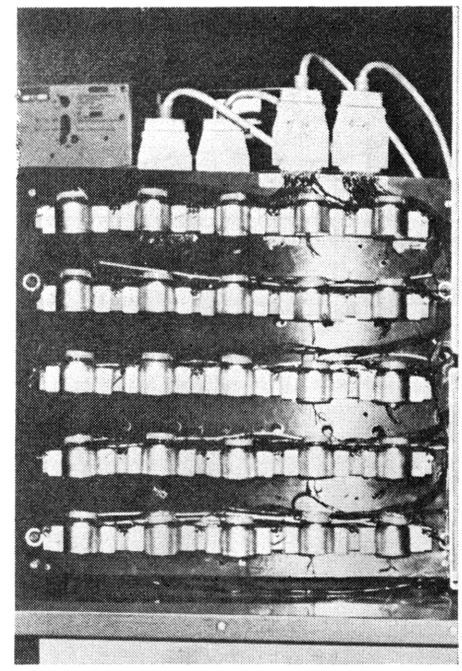


Bild 1. Zur Prüfung vorbereitete Kleinmotoren mit angeflanschten Motoretten

Die im weiteren angegebenen Zahlenwerte beziehen sich auf den bereits in [1] genannten Kleinstmotor, für den ein Keramikschichtkommutator als Anwendungsbeispiel zu entwickeln war.
Die Hauptkennwerte dieses Motors sind:

Betriebsspannung	4,5 bis 5,5 V
Motorstrom	etwa 100 mA
Drehzahl	2000 min^{-1}
Betriebsart	S1.

Die Motoretten bestehen aus kurzgeschlossenen Kommutatoren (den Prüflingen) und dem im Motor verwendeten Bürstensystem. (Der Begriff „Motorette" ist für die Nachbildung von Spulen elektrischer Maschinen bei der vergleichenden Prüfung von Isolationssystemen gebräuchlich. Er soll hier sinngemäß für Modellanordnungen, die unter Benutzung von originalen Bauteilen aufgebaut sind, verwendet werden.)
Die verwendeten Motoretten lassen sich mit sehr geringem Aufwand herstellen. So wurden im konkreten Fall die Keramikschichtkommutatoren auf dem freien Wellenende und die serienmäßig verwendeten Bürstenbrücken am Flansch der Antriebsmotoren befestigt. Die Prüfdrehzahl betrug 2000 min^{-1}, der Belastungsstrom für das Kommutator-Bürstensystem 100 mA.
Um die Ergebnisse statistisch zu sichern, ist es notwendig, entsprechend der anzuwendenden Auswertemethodik eine Mindestanzahl von Prüflingen für eine Versuchscharge aufzubauen. Bild 1 zeigt einen zur Prüfung fertiggestellten Prüfaufbau mit einer Versuchscharge von 25 Motoretten.

Tafel 1. Motorettentest — Ergebnisse nach t_{eff} = 1000 h

	Bürstenübergangsspannung $U_{Bü}$ mV	Schaltspitzenspannung U_{ss} mV
Konventioneller Kommutator	5,08	14
Keramik — Ni_xP_y — gal. Cu — gal. Ni/Ni_xP_y — gal. Au	4,63	4,5

Tafel 2. Prüfkriterien für den Versuchsmotor

Parameter	Grenzwert/Bedingungen
1. Motorleerlaufstrom bei Radiallast I_r in mA	$I_{r\,max}$ = 85 mA F_r = 1,5 N; n = 2000 min^{-1}
2. Langzeitkonstanz der Drehzahl $\frac{\Delta n}{n_N}$ in %	± 2,5 % für $0 \leq t \leq 500$ h ± 4,5 % für $500\ h \leq t \leq 1000$ h n_N = 2000 min^{-1}; F_r = 1,5 N; M = 0 mNcm
3. Schalleistungspegel L_{PA} in dB(A)	$L_{PA\,max}$ = 32 dB(A) (Meßfehler + 2 dB(A))
4. Funkstörspannung U_F in dB	$U_F \leq F_1$ (Grenzkurve nach TGL 20885/5) n = 2000 min^{-1}; M = 59 mNcm; F_r = 1,5 N

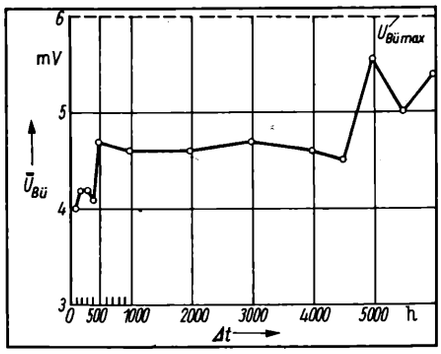


Bild 2. Im Motorettentest ermittelter Verlauf der Bürstenübergangsspannung an Keramikschichtkommutatoren (Schichtfolge: Ni_xP_y – Cu – Ni/Ni_xP_y – Au)

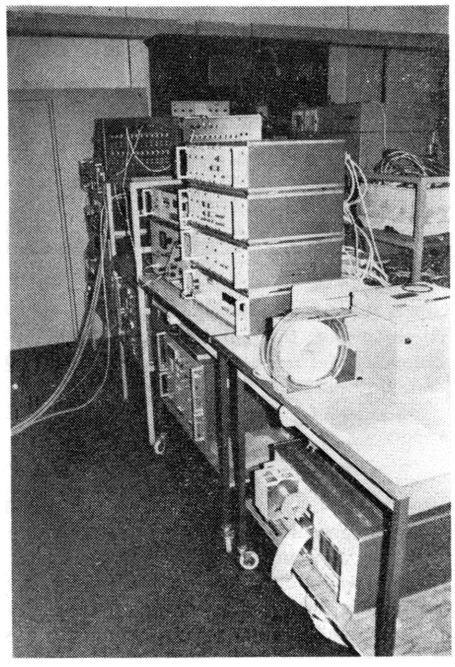


Bild 3. Automatisches Meßwerterfassungssystem für Dauertests von Kleinmaschinen

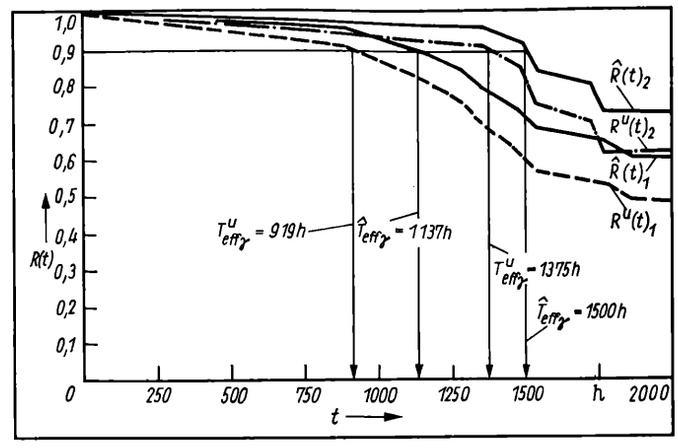


Bild 4. Überlebenswahrscheinlichkeit und γ-prozentuale effektive Lebensdauer mit einseitiger unterer Konfidenzgrenze (statistische Sicherheit $S = 0{,}9$)

Zur Beurteilung des Kontaktsystems eignen sich als Meßgrößen die Bürstenübergangsspannung $U_{Bü}$ und die Schaltspitzenspannung U_{ss}. Eine kontinuierliche Messung des mechanischen Verschleißes der Kontaktpartner ist auf einfache Weise nicht möglich; eine nachträgliche Messung an den demontierten Systemen bringt keine zusätzlichen Aussagen und kann entfallen. Die Bürstenübergangsspannung $U_{Bü}$ ist für ein konstantes Bürstensystem abhängig von der Verschleißfestigkeit und dem Kontaktwiderstand des Schichtsystems. Der Kontaktwiderstand wird vom Systemwiderstand des Schichtsystems (spezifischer elektrischer Widerstand der Schichten und ihre Schichtdicken) und von der Oberflächenrauhigkeit beeinflußt. Im vorliegenden Fall wurde das Einhalten einer Spannung $U_{Bü} \leqq 6$ mV überprüft. $U_{Bü}$ wurde kontinuierlich in bestimmten Meßzyklen (z. B. alle 6 h) von einem Meßwerterfassungssystem erfaßt und ausgedruckt. Bild 2 zeigt das Ergebnis des Tests mit dem schließlich ausgewählten Schichtsystem. Die Testzeit geht weit über die geforderte Lebensdauer des Kontaktsystems (1000 h) hinaus. Das ist erforderlich, um eine größere Sicherheit in der Beurteilung der Versuchsergebnisse zu erreichen (Trendermittlung). Es ist zu empfehlen, für die Prüfungen zur Vorauswahl bei den geeignet erscheinenden Systemen mindestens eine Prüfzeit anzusetzen, die der doppelten vorgegebenen Lebensdauer entspricht.

Die Schaltspitzenspannung U_{ss} ist eine Größe zur Beschreibung der beim Kommutierungsvorgang sich bildenden Spannungsspitzen zwischen Kommutator und Bürste und wird mit zunehmenden Verschleiß von Kommutator und Bürste größer. Die Größe U_{ss} ist auch vom Höhenversatz benachbarter Lamellen und dem Verschleißzustand der Schichtkombination und der Bürste bei gegebenem Bürstensystem abhängig.

In Tafel 1 sind Vergleichswerte von $U_{Bü}$ und U_{ss} zum herkömmlichen Kommutator bei 1000 h Betriebszeit enthalten. Der sehr viel kleinere Wert von U_{ss} beim Keramikschichtkommutator ist darauf zurückzuführen, daß auch nach längerer Betriebszeit kein Höhenversatz zwischen den Lamellen auftritt, wie das im allgemeinen bei konventionellen Systemen der Fall ist.

Tafel 3. Testergebnisse am Versuchsmotor mit herkömmlichen und Keramikschichtkommutator nach 2000 h

Parameter	Herkömmlicher Kommutator (Gruppe 1)	Keramikschichtkommutator (Gruppe 2)
I_r	Regressionsgerade	
	$\bar{I}_r = 62{,}5\ \text{mA} + 3{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mA}}{\text{h}} \cdot t$	$\bar{I}_r = 64{,}5\ \text{mA} + 8{,}4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mA}}{\text{h}} \cdot t$
	– ansteigender Trend für beide Gruppen statistisch gesichert	
n	$\bar{n} = 1988\ \text{min}^{-1} - 8{,}4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{min}^{-1}}{\text{h}} \cdot t$	$\bar{n} = 1993\ \text{min}^{-1} - 9{,}97 \cdot 10^{-3} \frac{\text{min}^{-1}}{\text{h}} \cdot t$
	– Trend nicht statistisch gesichert	– abfallender Trend statistisch gesichert
L_{PL}	$\bar{L}_{PA} = 26{,}67\ \text{dB(A)}$	$\bar{L}_{PA} = 28{,}1\ \text{dB(A)}$
	$- 1{,}8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{dB(A)}}{\text{h}} \cdot t$	$- 3{,}3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{dB(A)}}{\text{h}} \cdot t$
	– Trend für beide Gruppen nicht statistisch gesichert	
U_F	– starke Erhöhung bei $t = 500$ h beider Gruppen Grenzkurve wird im Prüfzeitraum nicht überschritten	

2. Anwendungserprobungen in Motoren

Im Gegensatz zu den Prüfungen bei der Vorauswahl von Schichtsystemen, die vorwiegend zeitterminiert durchgeführt werden, sollten bei Anwendungserprobungen Prüfpläne vom Typ (N, O, N) oder (N, O, r) Anwendung finden.

Um für die Auswertung mit parametrischen Schätzverfahren günstige Bedingungen zu sichern, ist bei der Anwendung eines ausfallterminierten Prüfplanes darauf zu achten, daß die Bedingung $r/N \geqq 0{,}6$ für $N \geqq 10$ eingehalten wird, wenn das Wahrscheinlichkeitsmodell einer Weibull-Verteilung entspricht. Ist der Stutzungsgrad $r/N < 0{,}6$, so ist der Genauigkeitsverlust bei der Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen erheblich und damit eine parametrische Auswertung nicht sinnvoll [2].

Bei der Durchführung der Anwendungserprobung gelten als Prüfkriterien die Parameter des Motors, die in Tafel 2 zusammengestellt sind.

Die Überwachung der Parameter Motorleerlaufstrom bei Radiallast und Drehzahl wurde in Zeitabständen zu jeweils 6 h mit einem automatischen Meßwerterfassungssystem (Bild 3) vorgenommen, wodurch eine gute Trendverfolgung der Motorparameter möglich war. Zur Bestimmung der Parameter Schalleistungspegel und Funkstörspannung ist ein weitaus größerer Aufwand erforderlich, da der zu messende Prüfling von den anderen Prüflingen getrennt werden muß und in speziell dafür vorgesehene Prüfvorrichtungen einzubauen ist. Aus diesem Grund erfolgte die Ermittlung von L_{PA} und U_F zu festen Zwischenmeßzeiten in Abständen zu 500 h.

Tafel 3 enthält Ergebnisse eines Dauerlaufs, der nach 2000 h beendet wurde. In diesem Test wurde eine Prüfcharge Motoren, die mit herkömmlichen und eine, die mit Keramikschichtkommutator ausgerüstet waren, gegenübergestellt.

Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der geprüften Chargen werden die Zuverlässigkeitskenngrößen Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ und γ-prozentuale effektive Lebensdauer $T_{eff\gamma}$ bestimmt. Ihre Ermittlung erfolgt auf der Basis der Ausfallzeitpunkte. Ein Motor-

ausfall ist dabei durch die erste Überschreitung eines seiner Grenzwerte (Tafel 2) oder durch Motorstillstand gekennzeichnet. Entsprechend der anfangs formulierten Voraussetzungen für die statistische Auswertung von Zuverlässigkeitstests werden die genannten Zuverlässigkeitskenngrößen auf der Grundlage verteilungsfreier Verfahren ermittelt.

Zur Sicherung der Aussagen werden neben den Punktschätzungen auch die für die Beurteilung der Zuverlässigkeit interessierenden einseitigen Konfidenzintervalle angegeben.

Folgende Gleichungen werden zur Bestimmung von $\hat{R}(t)$ und $R^u(t_i)$ verwendet [3]:

— Überlebenswahrscheinlichkeit $\hat{R}(t)$

$$\hat{R}(t_i) = \frac{N - r(t_i) + 1}{N + 1}$$

mit

N Anzahl der Prüflinge
$r(t_i)$ Anzahl der Ausfälle bis zum Zeitpunkt t_i

— untere Konfidenzgrenze des einseitigen Konfidenzintervalls

$$I = [R^u(t_i); 1]$$

$$R^u(t_i) = \left[1 + \frac{r(t_i)}{N - r(t_i) + 1} \cdot f_{m1, m2; 1-\alpha}\right]^{-1}$$

mit

$$m_1 = 2r(t_i),\ m_2 = 2(N - r(t_i) + 1)$$

$f_{m1, m2; 1-\alpha} \cdots (1 - \alpha)$ Quantil der Fisher-Verteilung.

Die Ermittlung der Schätzungen für $T_{\text{eff}\gamma}$ und $T^u_{\text{eff}\gamma}$ erfolgt grafisch mit Hilfe der Konfidenzschätzungen für die Überlebenswahrscheinlichkeit.

Bild 4 zeigt die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ mit dazugehöriger unterer Konfidenzgrenze und den sich daraus ergebenden Werten für $\hat{T}_{\text{eff}\gamma}$ und $T^u_{\text{eff}\gamma}$ der einzelnen Prüfchargen.

Es ist zu erkennen, daß im betrachteten Anwendungsfall Motoren mit Keramikschichtkommutator eine größere effektive Lebensdauer haben. Weiterhin kann festgestellt werden, daß bei Motoren mit Keramikschichtkommutator hinsichtlich des Zeitverhaltens der Motorparameter und der Anzahl der Totalausfälle günstigere Testergebnisse vorliegen.

Nach dem Dauerlauf wurden die Kommutatoren bewertet. Während bei Keramikschichtkommutatoren nur eine geringe Verschleißtiefe (etwa 2 µm) in der noch vorhandenen Goldschicht festgestellt wurde (siehe Bild 5), ist die Goldschicht beim Plast-Silberblech-Kommutator verschlissen, die Bürste läuft im Ag-Blech mit einer Verschleißtiefe von etwa 20 µm (Bild 6).

3. Anwendungsprobleme

Die Anwendungsprobleme ergeben sich vor allem daraus, daß der Keramikschichtkommutator ein von der gewohnten Verfahrensweise abweichendes Vorgehen bei der Montage des Läufers der Kleinmaschinen erfordert. Die einmal fertiggestellten Kommutatoren sind an ihrer Lauffläche nicht mehr bearbeitbar. Es ist im Gegenteil erforderlich, diese Lauffläche bei der Motorherstellung vor Beschädigungen zu schützen.

Herkömmlich laufen Montage und Anschließen der Kommutatoren folgendermaßen ab:

— Befestigen des Kommutators auf der Welle (meist Aufpressen)
— Anschließen der Wicklungen (Löten, Einpressen, Schweißen)
— Überdrehen oder Schleifen der Kommutatoroberfläche (Räumen der Kommutatorschlitze zwischen den Lamellen).

Mit dem Arbeitsgang Überdrehen bzw. Schleifen werden die notwendige Güte des Rundlaufs und der Kommutatoroberfläche erreicht. Da dieser Arbeitsgang bei Keramikschichtkommutatoren nicht möglich ist, ergeben sich im wesentlichen zwei Forderungen:

— Der Kommutator muß genau zentrisch montiert werden. Eine nachträgliche Korrektur des Rundlaufs ist nicht möglich.
— Beim Anschließen der Läuferwicklung darf die Kommutatoroberfläche nicht beschädigt werden. Es sind solche Kontaktierverfahren zu wählen, bei denen keine Rückstände von Flußmitteln, Isolierstoffresten o. ä. entstehen.

• Montage

Die Grundkörper für Keramikschichtkommutatoren lassen sich wirtschaftlich nur mit solchen Toleranzen der Innenbohrung (Abmaß, zentrischer Sitz) herstellen, die ein direktes Aufpressen auf die Motorwelle nicht ermöglichen. Es sind daher für die Montage andere Wege vorzuschlagen. Varianten hierfür sind:

— Zentrisches Fixieren von Welle und Kommutator zueinander in einer Vorrichtung und Verkleben beider Bauteile
— Fertigung der Keramikgrundkörper mit einer großen grobtolerierten Innenbohrung und Ausspritzen mit einem Plast in einer Form, die eine zentrische Innenbohrung mit den für eine Preßpassung erforderlichen Toleranzen gewährleistet. Das eingespritzte Plastteil kann so ausgeführt werden, daß gleichzeitig weitere Funktionen (z. B. Haken zum Fixieren der Anschlußdrähte ähnlich wie beim Hakenkommutator [4]) möglich sind
— Zentrierung des Kommutators an seinem Außenumfang in einem anderen auf der Welle befindlichen Bauteil (z. B. mit Plast vergossener und entsprechend bearbeiteter Wickelkopf der Läuferwicklung).

Bild 5. Laufspur der Bürsten auf einem Keramikschichtkommutator nach einer Laufzeit von 1500 h im Motortest

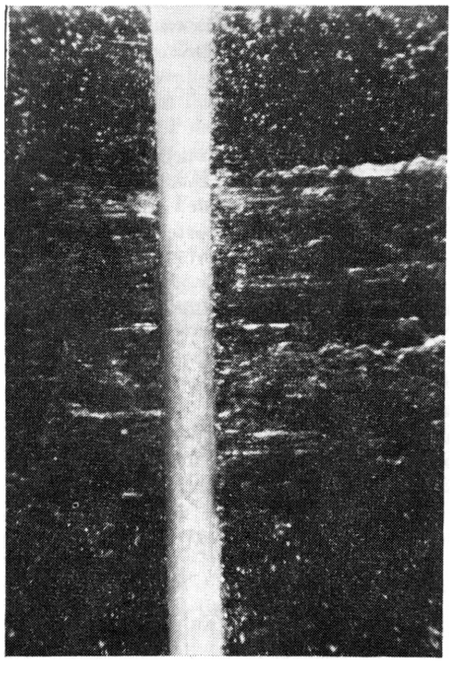


Bild 6. Laufspur der Bürsten auf einem konventionellen Kommutator nach einer Laufzeit von 1500 h im Motortest

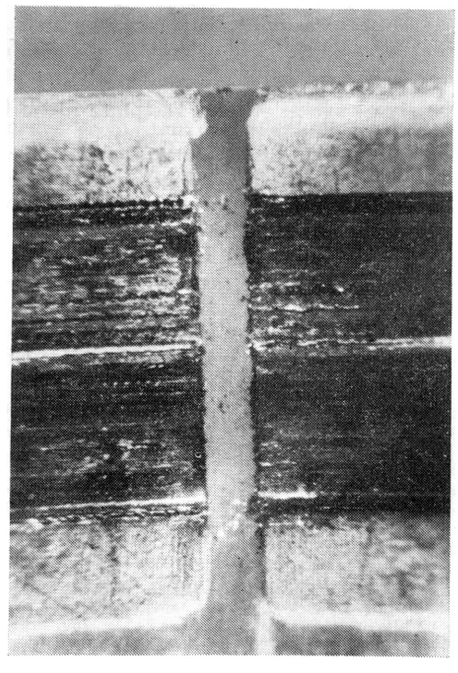
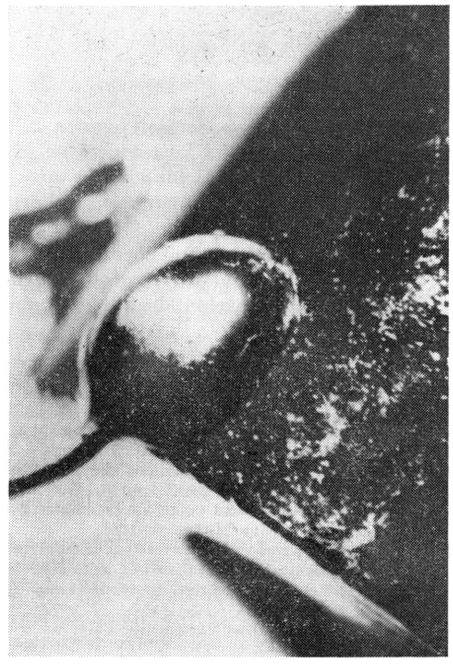


Bild 7. Übersichtsaufnahme eines Lötpunktes (Vergrößerung 25fach)



Erprobung und Einsatzprobleme bei Keramikschichtkommutatoren. Teil 2

R. Gesemann, KDT; G. Gebhardt, KDT; F. Müller, Mittweida; P. Stupin, KDT; Dresden

Mitteilung aus der Ingenieurhochschule Mittweida und dem VEB Elektromaschinenbau Dresden

Keramikschichtkommutatoren zeichnen sich bei minimalem Edelmetalleinsatz durch eine hohe Lebensdauer und eine rationelle Fertigung aus [1] [2]. Ihr Einsatz ist auf Kleinstmotoren mit geringem Leistungsumsatz begrenzt. Ein typischer Anwendungsfall sind Mikromotoren. Bei Motoren dieser Kategorie sind zwei unterschiedliche Konstruktionsprinzipien der Anker durchaus üblich. So werden von einigen Firmen eisenlose Glockenanker bevorzugt [3], andere wiederum benutzen genutete Eisenanker als Rotor. Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf einen Gleichstrommikromotor der erstgenannten Bauform. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Mikromotors. Zur Anwendungserprobung von Keramikschichtkommutatoren in Mikromotoren wurde ein Mikromotor ausgewählt, dessen Leistungsklasse durch folgende technische Daten charakterisiert ist:

Nennspannung U_N	$= 7$ V
Nenndrehmoment Md_N	$\leqq 6$ mNm
Nennstrom I_N (max)	$= 200$ mA
Nenndrehzahl n_N	$= 3000$ min^{-1}.

Die Forderung nach einem zuverlässig arbeitenden Kommutierungssystem ist mit einer zu garantierenden hohen Lebensdauer verbunden. Dafür muß ein mechanisch und elektrisch besonders verschleißfestes Schichtsystem entwickelt werden.

1. Verschleißfestes Schichtsystem für höchste Ansprüche

Mikromotoren werden prinzipiell mit Metall- oder Kohlebürsten angeboten. Kompatibel dazu besteht das Lamellenmaterial der Kommutatoren aus Blech oder Draht einer Edelmetall- (meist Silberlegierung) bzw. Kupferlegierung. Untersuchungen zum Verschleißmechanismus herkömmlicher Kommutatoren zeigen Kombinationen zwischen abrasivem, adhäsivem und elektrischem Verschleiß [4] [5] [6].

Elastische und plastische Deformationen des Lamellenmaterials durch die mit hoher Geschwindigkeit gleitenden Bürste führen zur Schädigung, zu Rissen und Herauslösen von Verschleißteilchen, die zunächst an der Bürste anhaften und den abrasiven Verschleiß des Lamellenmaterials vorantreiben.

Die damit auftretende Mikrorauhigkeit führt örtlich zu hohen Stromdichten. In Verbindung mit Bürstenschwingungen tritt vor allem am Lamellenspalt ein erhöhter elektrischer Verschleiß durch Materialwanderung auf [7]. Tiefe Einlaufspuren bis zu 100 µm und mehr erfordern Lamellenblechdicken von etwa 300 µm, um die erforderliche Betriebszuverlässigkeit des Kommutierungssystems zu gewährleisten.

Mit einem KSK, dessen Gesamtdicke des Schichtsystems nur etwa 20 µm beträgt, muß ein anderer Verschleißmechanismus gefordert werden, um eine Lebensdauer von 1000 bis 5000 h bei höheren Drehzahlen zu erreichen.

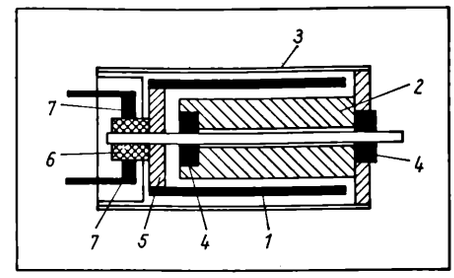
Prinzipiell wird ein Schichtaufbau wie in [1] beschrieben verwendet. Die Haftschicht aus Ni_xP_y sichert die ausreichende hohe Haftfestigkeit der Schichtlamellen auf Keramik.

Eine die Oberflächenrauhigkeit der Keramik einebnende Kupferschicht ist verantwortlich für die Funktion des konstanten Schichtkontaktes über lange Zeit. Die Rauhigkeit der Kupferschicht von etwa 2 µm wird durch die notwendige Diffusionssperre zum Laufschichtsystem nur geringfügig erhöht. Ni_xP_y-Schichten von etwa 3 µm verhindern eine Kupferdiffusion zur Oberfläche und sind durch ihre amorphe Struktur ein ausgezeichneter Träger der Laufschicht.

Verschiedene Laufschichtsysteme erweisen sich für Mikromotortypen geeignet. Kompatibel mit Metallbürsten hochprozentiger Silberlegierungen sind Legierungen aus Silber-Palladium oder Palladium-Nickel. Zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit werden die Schichten mit etwa 3 µm Dicke nacheinander galvanisch abgeschieden.

Es bildet sich nach einer Einlaufphase mit der Bürste aufgrund der Mikrorauhigkeit eine Pseudolegierung, z. B. aus der Ni-Laufschicht und der darunter liegenden Pd-Schicht. Die Verschleißfestigkeit nimmt zunächst mit der Freilegung von Pd-Kristalliten neben Ni-Kristalliten in der Lauffläche zu und bleibt dann während langer Laufzeiten konstant. Als Partner für Kohlebürsten sind als Laufschicht Kupfer auf Ni_xP_y-Trägerschichten geeignet.

Bild 1. Prinzipieller Aufbau eines Mikromotors
1 Läuferwicklung
2 Dauermagnet
3 Eisenrückfluß
4 Lager
5 Wicklungsträger
6 Kommutator
7 Metallbürsten



• Anschlußtechnik

Mit gutem Erfolg wurden bisher zwei Verbindungsverfahren labormäßig erprobt:

— Mikrolöten
Mit handelsüblichen Geräten können durch entsprechende Wahl der Lötzeiten und der Löttemperatur gute Verbindungen hergestellt werden. Die Anschlußdrähte müssen verzinnt sein. Bild 7 zeigt eine Übersichtsaufnahme eines Lötpunktes.

— Ultraschallschweißen
Mit diesem Verfahren sind ebenfalls gute Verbindungen zwischen Anschlußdrähten und Kommutatorlamellen herstellbar. Der Vorteil ist, daß die Anschlußdrähte nicht abisoliert zu werden brauchen.

2. Testplatz für Mikromotoren

Mechanisch verschleißfeste Schichtsysteme können mit geringem Aufwand in dem in [1] beschriebenen „Motorettenplatz" ausgewählt werden. Ein Nachweis der Eignung für den entsprechenden Motortyp kann erst mit einem erfolgreichen Motortest erbracht werden. Um zufällige Chargenfehler bei der Motorherstellung zu berücksichtigen, werden aus einer Charge je 20 Motoren mit herkömmlichen Plastkommutatoren und mit Keramikschichtkommutator ausgerüstet.

Die Montage des KSK erfolgt auf einer plastbeschichteten Welle (Schichtdicke etwa 20 µm) und die Kontaktierung der Schichtlamellen durch US-Schweißen.

Der Prüfstand setzt sich aus dem im Blockschaltbild (Bild 2) enthaltenen Elementen zusammen. Er sichert die automatische Erfassung der im Abschn. 1. genannten Prüfbedingungen. Die Motoren werden in einem Klimaschrank bei 25 °C und 60 % Luftfeuchte betrieben. Auf vier Querträger-Paaren sind 17 U-Schienen ver-

Literatur

[1] *Gesemann, R.; Kunze, G.; Stupin, P.:* Entwicklung von Keramikschichtkommutatoren. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 7, S. 262–264

[2] *Gebhardt, G.; Häfner, H.:* Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Gleichstromkleinstmotoren unter Berücksichtigung funktions- und umgebungsbedingter Beanspruchungen. Dissertation A. Ingenieurhochschule Mittweida, 1986

[3] *Storm, R.; Ebersberger, X.:* Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Qualitätsprüfungen im Elektromaschinenbau mit Methoden der mathematischen Statistik. Unveröffentlichtes Manuskript. Dresden, Techn. Universität, Sektion Mathematik 1979

[4] Kommutator ohne Anschlußelemente. Patentanmeldung AZ WP HO2K/271348 3 EA 5770

Prof. Dr. sc. techn. *Renate Gesemann* ist ordentlicher Professor; Dr.-Ing. *Gerhard Gebhardt* und Dr.-Ing. *Frank Müller* sind Assistenten an der Ingenieurhochschule Mittweida; Dr.-Ing. *Peter Stupin* ist Abteilungsleiter im VEB Elektromaschinenbau Dresden.

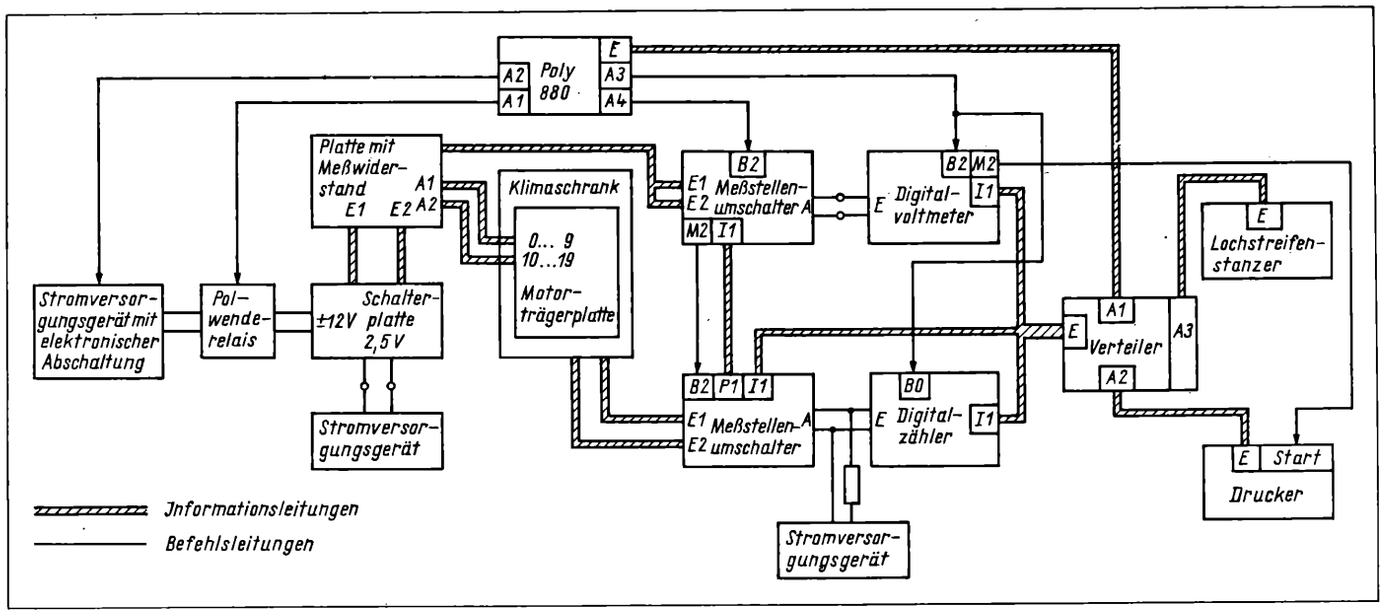


Bild 2. Blockschaltbild des Prüfstandes für Mikromotoren

schraubt, an deren hinterem Ende in jeweils gleichem Rasterabstand je ein Steckverbinder angebracht ist. Die Verdrahtung dieser Steckverbinder ist auf vier Hauptsteckverbinder geführt, die die Verkabelung des Prüfstandes aus dem Klimaschrank heraus ermöglichen. Auf den U-Schienen werden die Motorträgerstreifen eingesetzt, die ebenfalls mit Steckverbindern mit dem Gesamtsystem verbunden sind. Ein solcher Trägerstreifen mit den Abmessungen 340 mm × 30 mm × 60 mm trägt in drei keilförmigen Aufnahmen mit Andruckplatten die Motoren, die Wirbelstrombremsen zur Nachbildung der Last, die optoelektrischen Sensoren zur Drehzahlmessung sowie die elektrischen Anschlußmöglichkeiten der Motoren mit Steckverbindern.

Der Vorteil des als Einschub ausgelegten Motorträgerstreifens besteht darin, daß auch außerhalb des Prüfstandes an einem gut zugänglichen Meßplatz die Prüfung und Einstellung des Motors mit allen Funktionen möglich ist. An diesem Prüfplatz werden die Motoren montiert, die Stromaufnahme und das Oszillogramm im Leerlauf geprüft und gegebenenfalls die neutrale Zone nachgestellt. Am Meßplatz lassen sich noch das Drehzahlverhalten und der Impuls des entsprechenden Sensors beobachten. Gleichzeitig sind die Geräte zur Ermittluug der Funkstörspannung integriert.

Zur Stromversorgung des Dauerlauftestplatzes dienen drei Stromversorgungseinheiten mit unterschiedlichen Spannungen. Das sind einmal die Betriebsspannung für die Mikroglühlampen der optoelektrischen Sensoren, die Fototransistorspannung des gleichen Bausteins und die stabilisierte Spannung für den Betrieb der Motoren. Durch Nachrüstung der zwei parallel geschalteten Stromversorgungsgeräte vom Typ 3203 wird die Abschaltung der Spannung und der Wechsel der Polarität mit Relais möglich, um den Rechts-Linkslauf der Motoren zu gewährleisten.

Die Belastung der Motoren wird mit Hilfe von Wirbelstrombremsen eingestellt. Die Funktionseinheiten zur Erfassung der Meßwerte ermöglichen die Messung der Motorstromaufnahme und der Drehzahl im Abstand von 6 h. Es sind überwiegend Geräte des Systems ESDM 31, die durch einen hohen Grad der Flexibilität und durch die Möglichkeit zur Fernsteuerung aller Funktionsabläufe, Voreinstellungen, Schaltzeiten usw. gekennzeichnet sind.

Sie lassen sich zu einem Meßwert-Erfassungssystem verketten, wobei in der Meßkette zwei Meßstellenumschalter vom Typ S-3201.500 (für die Parameter Stromaufnahme, Periodendauer) das erste Glied und der Drucker S-3298.500 sowie das Meßwertlochersystem S-3297.500 den Abschluß dieser Kette bilden. Zur Messung der Motorparameter werden ein Digitalvoltmeter G-1203.010 und ein Digitalzähler S-2201.500 verwendet.

Der Digitalzähler S-2201.500 taktet im entsprechenden Rhythmus die beiden Meßstellenumschalter und den Drucker. Die Ausgabe der Meßwerte für die Stromaufnahme und Periodendauer erfolgt zusammen mit der Meßstellennummer (Motor-Nr.) als Druck- und als Lochstreifen.

Tafel 1. Ausfallzeiten im 10000-h-Test

Ausfallzeit in h	PK-Motor-Nr.	KSK-Motor-Nr.
822	37	
1824	38	
2123		13
2628	39	
3700	36	
3944		19
3992	27	
6442	34	
6464	26	
6596	21	
8325	33	
9046	30	
9292	23	16
9370		4
9586		3

3. Ergebnisse des Lebensdauertests

Die Zielstellung war, die bei dem eingesetzten Mikromotortyp mit Metallbürste garantierte Lebensdauer von 1000 h durch den Einsatz des KSK zu überbieten. Darüber binaus sollten durch einen Langzeittest über 10000 h Ausfallursachen ermittelt und daraus Schlußfolgerungen für weitere Qualitätsverbesserungen gezogen werden. Als Ausfallerscheinung trat in jedem Fall „Motorstillstand" auf (kein Anlaufen nach Drehrichtungswechsel).

In Tafel 1 sind für den herkömmlichen Kommutator (PK) und den Keramikschichtkommutator (KSK) die Ausfallzeiten für jeweils 19 Motoren zusammengestellt (je 1 Motor wurde als „Ausgangsqualität" nicht getestet).

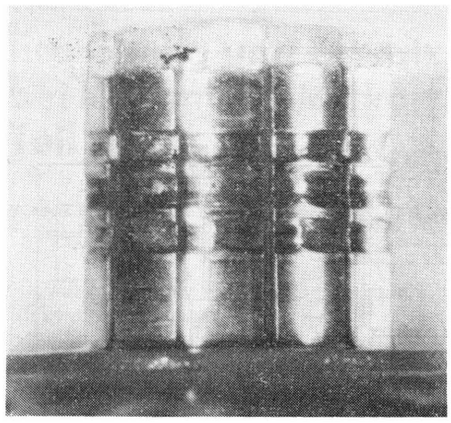
Zwei funktionstüchtige Motoren (Nr. 20 PK und Nr. 1 KSK) wurden dem Test nach 5200 h entnommen, um den Verschleiß der Kommutatoren zu prüfen.

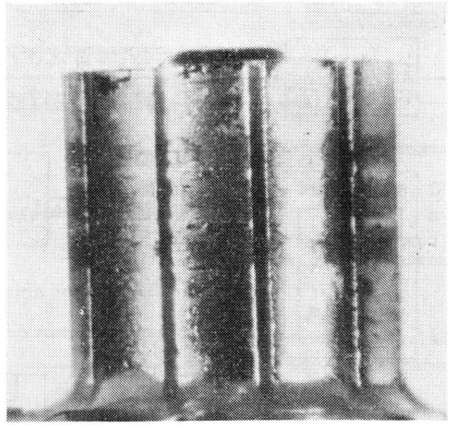
Als Ausfallursache zeigten sich z. B. am Motor Nr. 13 (KSK) eine Kontaktunterbrechung. Eine Schichtlamelle war an der Kante zerstört, obwohl insgesamt eine geringe Verschleißtiefe am Kommutator (etwa 1,5 µm) als auch an der Bürste (etwa 5,4 µm) gemessen wurde. Bei dem PK sind vor allem ein starker Kommutatorverschleiß, ein Durchlaufen und darauffolgendes Abbrechen der Bürsten (z. B. PK Nr. 39) für den Ausfall charakteristisch.

Von funktionstüchtigen Motoren sind in Tafel 2 die Verschleißtiefen nach 5200 (von je 1 Motor) und 10000 h (jeweils 5 Motoren) zusammengestellt.

Die Bilder 3 bis 6 zeigen charakteristische Verschleißbilder auf den Kommutatoren und Bürsten nach 10000 h Laufzeit.

Die Verschleißtiefen lassen bereits erkennen, daß die Lebensdauer des Keramikschichtkommutators die des herkömmlichen wesentlich übertrifft. Der Bürstenverschleiß bei dem herkömmlichen





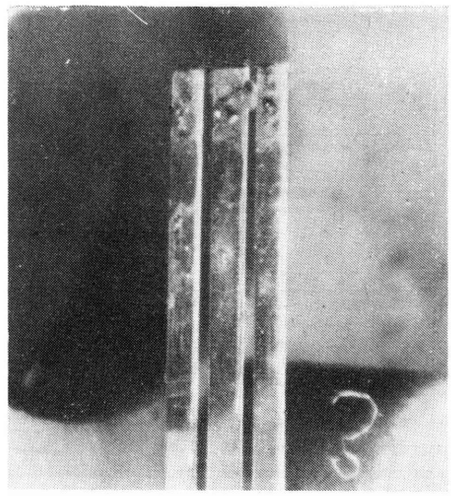


Bild 3. Herkömmlicher Kommutator (PK Nr. 35) gereinigt, Laufzeit 10000 h, V.: 14:1

Bild 4. Bürsten zum Kommutator PK Nr. 35 (siehe Bild 3), V.: 12:1

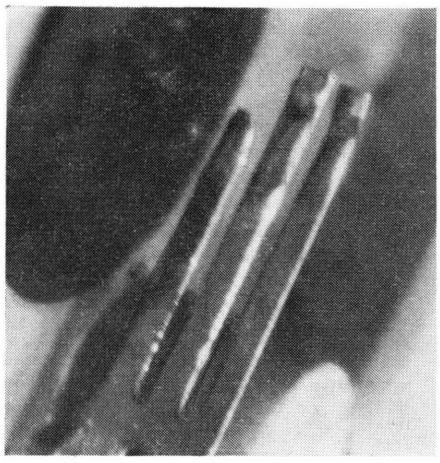


Bild 5. Keramikschichtkommutator (KSK Nr. 7) gereinigt, Laufzeit 10000 h, V.: 14:1

Bild 6. Bürsten zum KSK Nr. 7 (siehe Bild 5) gereinigt, V.: 8:1

Kommutator nimmt nicht linear zu. Es bilden sich zwei Verschleißkalotten beim Rechts- bzw. Linkslauf aus. Einzelne Bürstenfinger laufen durch oder verhaken an den tiefen Einlaufspuren in der Blechlamelle und brechen ab.

4. Prüfzuverlässigkeit der untersuchten Mikromotoren

Zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Erzeugnissen ist die Angabe von Zuverlässigkeitskenngrößen (ZVKG) notwendig. Die Berechnung der ZVKG erfolgt auf der Grundlage der in Tafel 1 verzeichneten Ausfälle bei Anwendung eines verteilungsfreien mathematisch-statistischen Verfahrens (nichtparametrische Schätzung).

Entsprechend der Zuverlässigkeitskonzeption ist für die Mikromotoren eine γ-prozentuale effektive Lebensdauer von $T_{\text{eff}\gamma} \geqq 1000$ h für $\gamma = 0{,}9$ und eine statistische Sicherheit $S = 0{,}9$ nachzuweisen.

Um diese Forderung statistisch erfüllen zu können, muß die untere Konfidenzgrenze $T^u_{\text{eff}\gamma} \geqq 1000$ h sein. Bei Verwendung verteilungsfreier Verfahren läßt sich $T_{\text{eff}\gamma}$ nicht analytisch berechnen. Sie muß grafisch mit Hilfe der Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt werden.

Daraus ergibt sich folgende äquivalente Forderung:

$R^U(t = 1000\text{ h}) \geqq \gamma$

für $\gamma = 0{,}9$ und $S = 0{,}9$.

Zur Ermittlung von $\hat{R}(t)$ und $R^U(t)$ durch nichtparametrische Schätzung werden folgende Beziehungen benutzt:

— Punktschätzung für die Überlebenswahrscheinlichkeit

$$\hat{R}(t) = \frac{N - r(t_i) + 1}{N + 1}; \tag{1}$$

N Anzahl der Prüflinge
$r(t_i)$ Anzahl der Ausfälle bis zum Zeitpunkt t_i

— untere Konfidenzgrenze des einseitigen Konfidenzintervalls

$[I = R^U(t_i)); 1]$

Tafel 2. Verschleißtiefen in den Laufspuren und auf den Bürsten

Kommutatortyp	Nach 5200 h Laufspur in µm	Bürste in µm	Nach 10000 h Laufspur in µm	Bürste in µm
PK	27 bis 194	91 bis 120	36 bis 248	30 bis 94
KSK	etwa 1,5	etwa 5,4	2,0 bis 3,8	8 bis 22

$$R^U(t_i) = \left[1 + \frac{r(t_i)}{N - r(t_i) + 1} \cdot f_{2r(t_i),\,2(N - r(t_i) + 1);\,1-\alpha}\right]^{-1} \tag{2}$$

mit $f_{m1,\,m2;\,1-\alpha} \ldots (1-\alpha)$ Quantil der Fisher-Verteilung und $m_1 = 2r(t_i)$ und $m_2 = 2N - r(t_i) + 1$ Freiheitsgraden.

Da zum Zeitpunkt $t = 5200$ h ein Motor für weitere Verschleißuntersuchungen dem Dauerlauf entnommen wurde, standen für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen jeweils nur $N = 18$ Motoren zur Verfügung. Die Motoren beider Prüfchargen wurden unter gleichen funktions- und umgebungsbedingten Beanspruchungen, wie Drehmomentenbelastung, Umgebungstemperatur und relative Luftfeuchte betrieben. So war ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich.

Im Bild 7 sind die Überlebenswahrscheinlichkeitsfunktion beider Chargen dargestellt. Es ist ersichtlich, daß sich die Chargen signifikant unterscheiden, da keine Überlappung der Konfidenzbereiche auftritt.

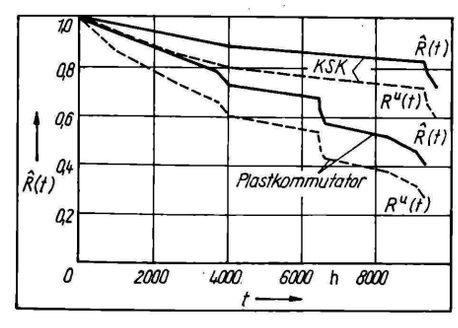
Als Gütefunktional für die Übereinstimmung der Werte für die γ-prozentuale effektive Lebensdauer wird der Quotient

$$G^* = \frac{T^U_{\text{eff}\gamma\,\text{I}}}{T^U_{\text{eff}\gamma\,\text{II}}} \tag{3}$$

definiert.

Bild 7. Gegenüberstellung der Überlebenswahrscheinlichkeit von Mikromotoren mit KSK und PK

Prüfbedingungen:
Spannung $U = 7$ V
Drehzahl $n \approx 3000$ min^{-1}
Motorstrom
$I_{\text{Mot}} = 200$ mA
Umgebungstemperatur
25 °C
rel. Luftfeuchte 85 %
Drehrichtungswechsel



Ummagnetisierungsverluste weichmagnetischer Kerne bei Mittelfrequenz

N. Hildebrand, KDT, Dresden; A. Lippschus, Erfurt; D. Roseburg, KDT, Dresden

Verwendete Formelzeichen

A_B	Querschnittsfläche der B-Meßspule
A_H	Querschnittsfläche der H-Meßspule
A_{Fe}	Eisenquerschnittsfläche
B	magnetische Induktion
B_{max}	Maximalwert der magnetischen Induktion
d	Blechdicke
f	Frequenz
H	magnetische Feldstärke
ΔH_m	mittlere Breite der Hystereseschleife
i_E	Erregerstrom
k_{Fe}	Eisenfüllfaktor
l_m	mittlere Eisenweglänge
m_{Fe}	Eisenmasse
n	ganze Zahl
N_B	Windungszahl der B-Meßspule
N_H	Windungszahl der H-Meßspule
t_1	Schließzeitpunkt, Schließwinkel
$t_2 - t_1$	Schließdauer
T	Periodendauer
u	Spannung
u_B	Spannung an der B-Meßspule
u_H	Spannung an der H-Meßspule
u_E	Erregerspannung
u_K	korrelierte Spannung
U_{Km}	Mittelwert der korrelierten Spannung
u_S	Steuerspannung

Dipl.-Ing. *Nicol Hildebrand* ist wissenschaftlicher Assistent an der Technischen Universität Dresden; Dipl.-Ing. *Andreas Lippschus* ist Technologe im VEB Robotron Optima Erfurt; Dr. sc. techn. *Detlev Roseburg* ist Hochschuldozent an der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik.

$T^U_{\text{eff}\,\gamma\,\text{I}}$	untere Konfidenzgrenze der γ-prozentualen effektiven Lebensdauer der Charge I (KSK),
$T^U_{\text{eff}\,\gamma\,\text{II}}$	untere Konfidenzgrenze der γ-prozentualen effektiven Lebensdauer der Charge II (PK).

Für G^* ergibt sich folgender Wert:

$$G^* = \frac{T^U_{\text{eff}\,\gamma\,\text{I}}}{T^U_{\text{eff}\,\gamma\,\text{II}}} = \frac{1800\,\text{h}}{670\,\text{h}} = 2{,}7\,.$$

Im untersuchten Fall erreichen die Mikromotoren, die mit KSK ausgerüstet sind, entsprechend dem Gütefunktional eine um den Faktor 2,7 größere Lebensdauer zum Zuverlässigkeitsniveau $\gamma = 0{,}9$ als die Motoren gleicher Baureihe mit herkömmlichem Kommutator. Diese Aussage ist statistisch gesichert.

Literatur

[1] *Gesemann, R.; Spindler, J.; Stupin, P.:* Entwicklung von Keramikschichtkommutatoren. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 7, S. 262–264
[2] *Gesemann, R.; Gebhardt, G.; Stupin, P.:* Erprobung und Einsatzprobleme bei Keramikschichtkommutatoren. Teil 1. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 245 bis 248
[3] Firmenschrift der Firma Faulhaber GmbH & Co, KG (BRD): Faulhaber DC-Mikromotoren 1984
[4] *Ruthardt, R.:* Tribologie elektrischer Kontakte. Metall 29 (1975) 6, S. 576–581
[5] *Wagner, G.:* Zur Einteilung von Verschleißvorgängen nach Grundmechanismen. Schmierungstechnik, Berlin 6 (1975) 10, S. 941–949
[6] *Hesketh, R.:* Electromigration the electron wind. Phys. Rev. B 19 (1979) 4, S. 1727 bis 1733
[7] *Schubert, P.*, u.a.: Kommutierungsuntersuchungen bei Gleichstromkleinstmaschinen. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 12, S. 622–624

EA 5835

Bild 1. Schnittbandkern
1 Erregerwicklung; 2 H-Meßwicklung; 3 B-Meßwicklung; 4 Kern

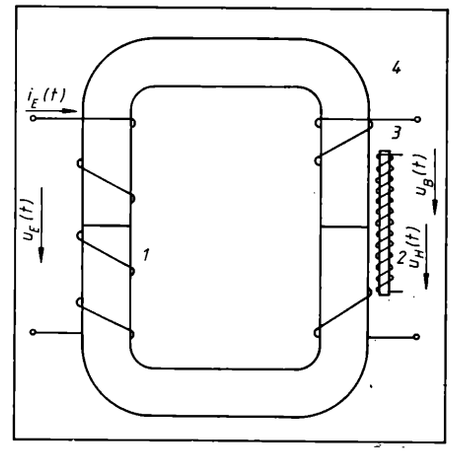
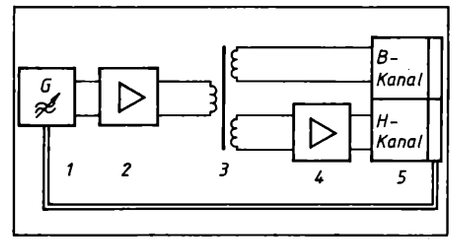


Bild 2. Versuchsschaltung
1 Sinusgenerator
2 500 VA-Leistungsverstärker
3 Schnittbandkern
4 Vorverstärker
5 Vektorvoltmeter



u_R	Referenzspannung
v	spezifische Ummagnetisierungsverluste
μ_0	magnetische Feldkonstante
ϱ	Dichte

Ein Ziel der gegenwärtigen Entwicklung weichmagnetischer Bleche und Bänder ist es, die Ummagnetisierungsverluste im Magnetkern bzw. je Bauvolumen elektromagnetischer Energiewandler weiter zu senken. Dabei sind zwei gegenläufige Tendenzen erkennbar:

— Eisen-Silizium-Bleche werden zur Reduzierung der Wirbelstromverluste immer dünner ausgewalzt (0,3; 0,2; 0,1 mm)
— Amorphe Bänder dagegen werden zur Verbesserung des Eisenfüllfaktors immer dicker hergestellt (30, 40, 50 µm).

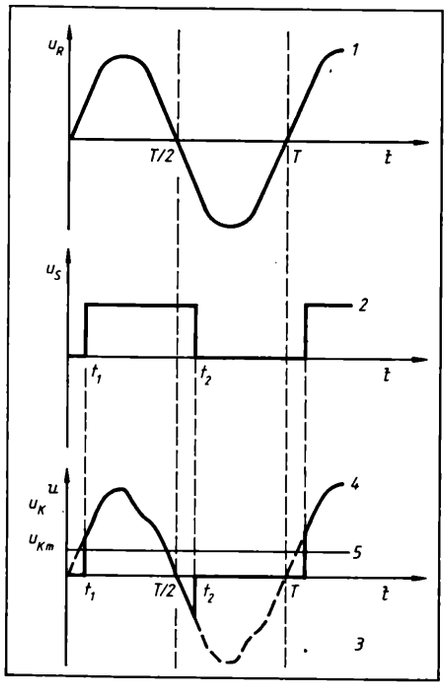
Vor allem für Magnetkreise im Mittelfrequenzbereich sind auf Grund dieser Entwicklung und der derzeit herstellbaren Bandbreiten (20 bis 200 mm) amorphe Bleche zu einer Alternativlösung gegenüber FeSi-Blechen geworden.
Nachfolgende Meßergebnisse für Schnittbandkerne bei Frequenzen von 400 bis 800 Hz sollen das unterstreichen.

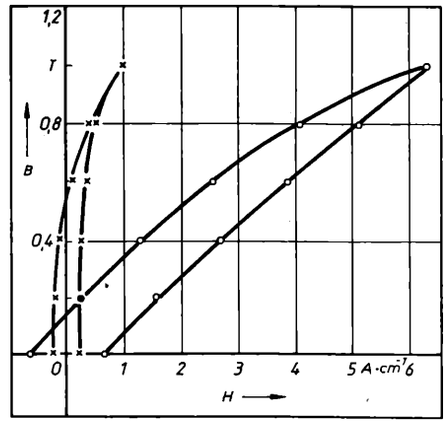
1. Versuchsanordnung

Bild 1 zeigt schematisch einen der untersuchten Schnittbandkerne mit Erreger-, Feldstärke- und Induktionsmeßwicklung. Die der Feldstärke bzw. der Induktion proportionalen Spannungen $u_H(t)$ und $u_B(t)$ werden mit dem in [1] beschriebenen elektronischen Vektorvoltmeter ausgewertet. Dazu ist es, wie im Bild 2 dargestellt, erforderlich, die Erregerwicklung und das Vektorvoltmeter gleichfrequent möglichst aus einer gemeinsamen Quelle zu betreiben. Die Erregerleistung wird von einem Leistungsverstärker bereitgestellt; für kleine Feldstärken ist im H-Kanal ein Vorverstärker erforderlich.
Auf Grund des Abstandes der H-Meßwicklung von der Kernoberfläche wird die magnetische Feldstärke etwa 5 % zu gering erfaßt. Der Fehler bei der B-Messung entspricht dem Fehler des Vektorvoltmeters von $\pm$ 0,5 %.

2. Meßwerterfassung

Das Vektorvoltmeter [1] stellt einen elektronischen Schalter dar, der synchron zu einer Referenzfrequenz periodisch geöffnet bzw. geschlossen wird. Die Schrittweite des Gerätes für Schließwinkel und Schließdauer beträgt im Bereich von 80 bis 4500 Hz 1° (Periode des Meßsignals 360°).
Wie das Bild 3 zum Prinzip des Vektorvoltmeters verdeutlicht, ist es möglich, Teile des Meßsignals für eine Verarbeitung herauszuschneiden. Ist das Meßsignal, wie im vorliegenden Fall, dem Diffe-





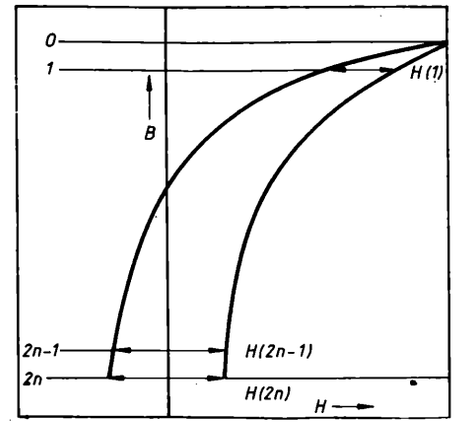


Bild 3. Prinzip des Vektorvoltmeters nach [1]
1 Referenzspannung; 2 Steuerspannung; 3 Meßsignal; 4 korreliertes Meßsignal; 5 Mittelwert des korrelierten Meßsignals

Bild 4. Dynamische Hystereseschleifen bei B_{max} = 1 T, f = 400 Hz 1 $Fe_{80}B_{14}Si_6$-Bandkern; 2 FeSi-Bandkern

Bild 5. Ermittlung der mittleren Breite der Hystereseschleife

Tafel 1. Daten der Schnittbandkerne

Größe/Dimension	$Fe_{80}B_{14}Si_6$-Kern	FeSi-Kern
d in mm	0,026	0,130
l_m in mm	480	463
A_{Fe} in cm²	3,59	4,80
m_{Fe} in kg	1,260	1,720
k_{Fe}	0,756	0,923

rential der interessierenden Größe proportional, dann liefert eine Mittelwertbildung (Integration) des herausgeschnittenen Signals (korreliertes Signal) den Meßwert. Speziell für symmetrische Meßgrößen-Zeitverläufe und eine Schließdauer von 180° (halbe Periodendauer) ergibt sich:

$$U_{Bm} = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_1+T/2} u_B(t)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_1+T/2} N_B A_B \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t, \qquad (1)$$

$U_{Bm} = 2 N_B A_B f B(t_1)$ bzw. $U_{Hm} = 2 N_H A_H f \mu_0 H(t_1)$.
Das heißt, bei Veränderung des Schließwinkels (Zeitpunkt t_1) von 0° bis 360° liefert das Vektorvoltmeter die Zeitverläufe

$$B(t) = \frac{U_{Bm}(t_1 = t)}{2 N_B A_B f}, \quad H(t) = \frac{U_{Hm}(t_1 = t)}{2 N_H A_H \mu_0 f} \qquad (2)$$

und damit die dynamische Hystereseschleife $B(t) = f(H(t))$. Bild 4 zeigt so ermittelte Hystereseschleifen der Fe—Si- und $Fe_{80}B_{14}Si_6$-Schnittbandkerne für eine Veränderung des Schließwinkels von 0° bis 180° bei 400 Hz und B_{max} = 1 T.
Mit der umschriebenen Fläche der Hystereseschleifen sind die zu ermittelnden Ummagnetisierungsverluste gegeben.

3. Auswertung der dynamischen Hystereseschleifen

Nach [2] sind zur Erzielung akzeptabler Genauigkeiten ≧ 10 Stützstellen bei der Auswertung der im Bild 4 dargestellten Hysterese-Halbschleifen erforderlich. Bei linearer $2n$-facher-Unterteilung des Aussteuerungswertes B_{max} und bei Anwendung der Simpsonschen Regel zur Ermittlung der mittleren Breite der Hystereseschleife ΔH_m gemäß Bild 5

$$\Delta H_m = \frac{2\Delta H(1) + \Delta H(2) + 2\Delta H(3) + \cdots + \cdots}{\cdots \frac{2\Delta H(2n-1) + 0{,}5\,\Delta H(2n)}{3n}}$$

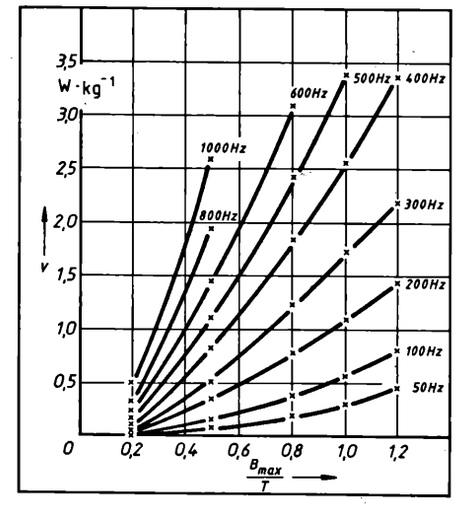
Tafel 2. Spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Frequenzänderung für B_{max} = 0,5 T

f Hz	v W kg⁻¹ $Fe_{80}B_{14}Si_6$	v W kg⁻¹ FeSi	Δv W kg⁻¹	Δv %
200	0,35	1,50	1,15	76,7
400	0,81	3,40	2,59	76,2
600	1,45	5,10	3,65	71,6
800	2,30	7,20	4,90	68,2

Tafel 3. Spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Induktionsänderung für f = 400 Hz

B_{max} T	v W kg⁻¹ $Fe_{80}B_{14}Si_6$	v W kg⁻¹ FeSi	Δv W kg⁻¹	Δv %
0,5	0,81	3,40	2,59	76,2
0,8	1,82	7,80	5,98	76,7
1,0	2,52	12,10	9,58	79,2
1,2	3,35	–	–	–

Bild 6. Spezifische Ummagnetisierungsverluste für $Fe_{80}B_{14}Si_6$



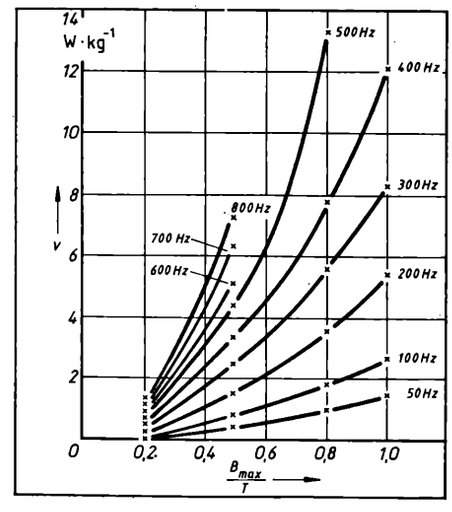


Bild 7. Spezifische Ummagnetisierungsverluste für FeSi

Weiterentwicklung der Niederspannungs-Isolationskoordination durch Einbeziehung einer statistischen Betrachtungsweise[1)]

H. Küttner, KDT, Cunersdorf

Die seit Oktober 1986 verbindliche Neuausgabe des Standards TGL 20445/03 [1] gilt für elektrotechnische Anlagen generell sowie für neu- und weiterzuentwickelnde Betriebsmittel.
Unsicherheiten bestehen derzeit noch darin, welches Sicherheitsniveau bei Anwendung der Isolations- und Schutzpegel in den fünf Anlagenklassen bzw. sechs Isolationsgruppen für Betriebsmittel realisiert wird, und ob die Isolieraufgabe damit bereits technisch-ökonomisch optimal gelöst ist. Die Zuverlässigkeit der Isolieranordnungen kann durch die Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit quantifiziert werden, wenn der Wahrscheinlichkeitscharakter der Zufallsgrößen Überspannungsbeanspruchung und statistische Stehfestigkeit berücksichtigt wird. Ein zweiter Problemkreis beschäftigt sich mit der Berechnung der für kleine Fehlerwahrscheinlichkeiten notwendigen statistischen Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von Überspannungsparametern sowie konstruktiven und Umgebungsbedingungen.
Die zu erwartende Konkretisierung der Unterscheidungsmerkmale der Anlagenklassen bzw. Isolationsgruppen würden Hersteller und Betreiber elektrotechnischer Anlagen und Betriebsmittel dazu befähigen, eine statistisch begründete Zuordnung von Erzeugnissen zu Anlagenklassen bzw. Isolationsgruppen vorzunehmen. Aus der statistischen Betrachtung ergeben sich ferner Konsequenzen für den praktischen Überspannungsschutz.
Das bei Anwendung der Schutzpegel I und/oder II verbleibende Fehlerrisiko läßt sich abschätzen, wenn zusätzlich die Schadenskosten/Fehlerereignis einbezogen werden.

1. Derzeitige Methoden der NS-Isolationskoordination

Das in TGL 20445/03 [1] enthaltene Verfahren entspricht der aus der HS-Technik bekannten konventionellen oder empirischen Methode der Isolationskoordination für Blitzimpulsspannung. Die Stufung der Mindest-Stehblitzspannung in Abhängigkeit von der maximalen Blitzüberspannung wird für die sechs Isolationsgruppen bei unterschiedlichen Auswahlspannungen mit Hilfe empirischer Sicherheitsfaktoren vorgenommen. Den Nenn-Stehblitzspannungen kommt dabei — abweichend von der Vorgehensweise in der HS-Isolationskoordination — die Aufgabe zu, dem Konstrukteur durch die Bestimmung der dazugehörigen Luftstrecken Bemessungsunterlagen zu geben.
Unterscheidungsmerkmale der Anlagenklassen, die grundsätzlich Betriebsmittel mit einer bestimmten Isolationsgruppe bedingen, sind das Überspannungsangebot, Maßnahmen des Überspannungsschutzes, Trennstreckenrealisierungen, Schadensauswirkungen und Zuverlässigkeitsforderungen. Die Anwendung von Überspannungsschutzeinrichtungen [3] zur Schaffung definierter Überspannungsverhältnisse mit Schutzpegel I und/oder II stellt nicht nur eine Teilaufgabe der Isolationskoordination dar, sondern sie ist Voraussetzung für eine Einteilung von Anlagen in Klassen und von Betriebsmitteln in Isolationsgruppen nach dem wichtigsten Einteilungsmerkmal.
Die Einflußgröße Schadensauswirkung läßt sich durch den ständig steigenden Einsatz von msr- und mikroelektronischen Einrichtungen in elektrotechnischen Anlagen und durch die hohen Kosten beim Stillstand einer Automatisierungsanlage nicht mehr allein durch die Nennstromstärke einer Sicherung bzw. den Anschlußwert eines Abnehmers charakterisieren.

2. Moderne Koordinationsmethoden der HS-Technik und Probleme ihrer Anwendung

Seit Ende der 60er Jahre werden in der HS-Isolationskoordination statistische Betrachtungen und Überlegungen bei der Bemessung von Höchstspannungsanlagen einbezogen. Ziel der neuen Bemessung war die Abschätzung des Überschlagrisikos bei bestimmten Schalthandlungen und Fehlern in Abhängigkeit vom gewählten Isolationspegel, d. h. die Ermittlung der Häufigkeit der zu erwartenden Überschläge.
Koettnitz und *Bauer* [4] bis [7] trugen wesentlich zur Ausarbeitung, Weiterentwicklung und Durchdringung der HS-Isolationskoordination mit semi- und vollstatistischen Methoden bei.
Nach [8] werden drei Methoden unterschieden:

— konventionelle oder empirische Methode

— deterministische oder semistatistische Methode

— (voll)statistische Methode.

Im Bild 1 sind die Merkmale Bemessungsprinzip und Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteile der Methoden gegenübergestellt. Die konventionelle oder empirische Methode entspricht dem derzeitig in der NS-Technik angewandten Koordinationsprinzip. In [8] wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß diese Methode nur dann angewendet werden darf, wenn die Überspannungsbegrenzung auf den Schutzpegel der Überspannungsschutzeinrichtungen erfolgt. Die Isolation wird dann als hinreichend angesehen, wenn ihre Stehspannung gleich dem Produkt aus Schutzpegel und empirischen Sicherheitsfaktor ist.
Das auch als Festwertverfahren bezeichnete Koordinationsprinzip berücksichtigt mithin über den empirischen Sicherheitsfaktor verbal die Auswirkungen der statistischen Verteilungen der koordinierten

Dr.-Ing. *Horst Küttner* ist wissenschaftlicher Oberassistent an der Ingenieurhochschule Zwickau, Sektion Elektroautomatisierungstechnik, Wissenschaftsbereich Energietechnik, und Mitglied der Arbeitsgruppe „Koordination der Niederspannungsbetriebsmittel und -anlagen" im FUA 0.3 „Isolationskoordination" der KDT.

[1)] Der Autor verdankt Prof. em. Dr.-Ing. *Koettnitz* (†) und Dr.-Ing. *Naumann* wertvolle Hinweise.

folgen die spezifischen Ummagnetisierungsverluste v zu:

$$v = \frac{f}{\varrho} \cdot 2\, B_{max}\, \Delta H_m \cdot 10^{-1}. \quad (4)$$

v in Wkg^{-1}, f in Hz, ϱ in gcm^3, B_{max} in T, H_m in Acm^{-1}.

4. Meßergebnisse

Die Daten der untersuchten Schnittbandkerne sind in Tafel 1 zusammengestellt. Die Bilder 6 und 7 enthalten die bei 10 Stützstellen aus den dynamischen Hystereseschleifen ermittelten spezifischen Verluste. In den Tafeln 2 und 3 erfolgt eine Gegenüberstellung der ermittelten unterschiedlichen Verlustziffern bei unterschiedlichen Frequenzen und verschiedenen Werten von B_{max}. Deutlich ist zu erkennen, daß der Einsatz von amorphem Material erhebliche Verlustabsenkungen (etwa 70 %) gegenüber Fe—Si-Blech bringt.

5. Zusammenfassung

Die vorgestellten Vergleichsmessungen an Schnittbandkernen aus $Fe_{80}B_{14}Si_6$- und FeSi-Band im Mittelfrequenzbereich zeigen, daß für einen Induktionsbereich bis $B_{max} = 1{,}2$ T amorphe Materialien eine Alternativlösung zu FeSi-Blech verbunden mit einer etwa 70 %igen Verlustabsenkung bilden.
Einem verstärkten Einsatz amorpher Materialien stehen zum jetzigen Zeitpunkt neben der Verfügbarkeit und erhöhten Kosten allerdings auch erhebliche technologische Schwierigkeiten bei der Bearbeitung entgegen.

Literatur

[1] *Peinelt, W.; Heinemann, A.:* Vektorvoltmeter für NF-Anwendungen. radio fernsehen elektronik. Berlin 34 (1985) 6

[2] *Koppelmann, F.:* Wechselstrommeßtechnik unter besonderer Berücksichtigung des mechanischen Präzisionsgleichrichters. Berlin: Springer-Verlag 1956

EA 5691

Größen, umwelt- und alterungsbedingte Isolationsminderungen sowie den Schutzbereich von Überspannungsableitern. Die Einhaltung der Isolationspegel ist durch Spannungsprüfverfahren zu gewährleisten. Der Nachteil der einfach handhabbaren Methode standardisierter Isolations- und Schutzpegel besteht darin, daß die empirischen Sicherheitsfaktoren keine Sicherheit garantieren können, da die Fehlerwahrscheinlichkeit unbekannt ist. Will man diesen Nachteil beseitigen, wird eine Betrachtungsweise auf statistischer Basis unumgänglich.

Bei der deterministischen oder semistatistischen Methode wird die Isolation unter Bezug auf die höchste am Betriebsmittel auftretende Überspannung bestimmt. Zur Ermittlung der maximalen Spannungsbeanspruchung ist die räumliche Verteilung der Überspannungen in der elektrotechnischen Anlage unter Beachtung der Überspannungsableiter-Einbauorte zu ermitteln. Die Stehspannung der Isolation muß über der am Einbauort auftretenden maximalen Überspannungsbeanspruchung liegen. Wird sie auf deterministischer Basis, d.h. als „absolutes" Maximum digital oder analog ermittelt, handelt es sich um die deterministische Methode. Die semistatistische Methode liegt vor, wenn die maximale Spannungsbeanspruchung auf der Basis einer vereinfachten statistischen Betrachtung, z.B. einer niedrigen Ereignishäufigkeit, berechnet wurde. Die semistatistische Methode ermöglicht die Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeit, die kleiner oder gleich der Eintrittswahrscheinlichkeit der maximalen Spannungsbeanspruchung ist. Voraussetzung zur Anwendung der semistatistischen Methode ist damit nicht nur die Kenntnis der räumlichen Verteilung der maximalen Überspannungsbeanspruchung in der Anlage, sondern auch die zu einer geringen Ereignishäufigkeit gehörenden maximalen Überspannungen. Hierzu wird z.B. die 2-%-Überspannung $\hat{u}_{02\ddot{u}}$ verwendet, d.h. diejenige Überspannung, die nur von 2 % aller Überspannungsbeanspruchungen überschritten wird.

Die umfassendsten Informationen über Spannungsbeanspruchung und Isoliervermögen setzt die (voll)statistische Methode voraus. Es ist die Kenntnis der Eintrittswahrscheinlichkeit aller möglichen Spannungsbeanspruchungen (Verteilungsfunktion) an den unterschiedlichen Orten einer elektrotechnischen Anlage und der Durchbruchwahrscheinlichkeiten der Isolierungen, wenn sie derartigen Spannungsbeanspruchungen ausgesetzt sind (Verhaltensfunktion), erforderlich. Die Isolation wird als richtig bemessen angesehen, wenn die aus der Überspannungsdichte- und Verhaltensfunktion ermittelte Fehlerwahrscheinlichkeit hinreichend niedrig ist. Das Grundprinzip der statistischen Methode besteht damit in einer solchen Wahl des Abstandes zwischen den beiden Funktionen in Form des statistischen Sicherheitsfaktors, daß eine wirtschaftliche Zuverlässigkeit erreicht wird.

Bei der praktischen Anwendung werden zwei Wege beschritten:

1. Die Umgebungsbedingungen sind definiert (nahezu konstant), die Spannungsbeanspruchung wird als variabel angenommen.
2. Die Spannungsbeanspruchung ist definiert (z.B. die Nennspannung) und die Umgebungsbedingungen (Verschmutzungsgrad, Temperatur, Windkräfte) sind variabel.

Die gegenwärtige Situation bei der Umsetzung der genannten Koordinations-Methoden der HS-Technik ist dadurch gekennzeichnet, daß die wissenschaftliche Aufbereitung weiter vorangeschritten ist als die praktische Durchdringung. Gegenüber früheren Orientierungen auf semi- und vollstatistische Methoden ist eine Wende eingetreten, indem gegenwärtig der Trend zu einer auf statistische Betrachtungen basierenden deterministischen Isolationskoordination zu verzeichnen ist. Ursache hierfür ist der enorme experimentelle und rechnerische Aufwand, den die geschlossene statistische Isolationskoordination erfordert. In der HS-Technik sind insgesamt zu geringe Kenntnisse über die Kennwerte der Verteilungs- und Verhaltensfunktionen sowie die vorhandene Ereignis- und Schadenshäufigkeit vorhanden. Für die vollstatistische Methode würden darüber hinaus Großrechner benötigt, die oft nicht zur Verfügung stehen. Der Trend geht deshalb wieder zu vereinfachten Bemessungsverfahren, die mit den allgemein verfügbaren Büro- und Personalcomputern mit einigen kByte Speichervermögen realisierbar sind.

Bild 1. Merkmale und Methoden zur Isolationskoordination in der HS-Technik (Einteilung der Methoden nach [8])
$\hat{u}_{nst}$ Nenn-Stehspannung; $\hat{u}_{nbegr}$ Nenn-Begrenzungsspannung; c empirischer Sicherheitsfaktor; $\hat{u}_{\ddot{u}max}$ max. Überspannung; $\hat{u}_{pst}$ statistische Stehspannung; $\hat{u}_{p\ddot{u}}$ statistische Überspannung; $c_{pst/p\ddot{u}}$ statistischer Überspannungsfaktor; pf Fehlerwahrscheinlichkeit; $\hat{u}_{02\ddot{u}}$ 2-%-Überspannung; *ÜDF* Überspannungsdichtefunktion; *VHF* Verhaltensfunktion der Isolierung

Merkmal	Konventionelle oder empirische Methode	Deterministische/Semistatistische Methode ⓐ ⓑ	(Voll)statistische Methode
Bemessungsprinzip	$\hat{u}_{nst} = \hat{u}_{nbegr} \cdot c$	$\hat{u}_{nst} > \hat{u}_{\ddot{u}max}$	$\hat{u}_{pst} = \hat{u}_{p\ddot{u}} \cdot c_{pst/p\ddot{u}}$ (pf) für $pf \leq 10^{-4}$
Voraussetzungen	① Anwendung von Überspannungsschutzmaßnahmen ② Wahl des empirischen Sicherheitsfaktors c	① Anwendung von Überspannungsschutzmaßnahmen ② Räumliche Verteilung von $\hat{u}_{\ddot{u}max}$ im Netz (analoge od. digitale Modellierung des Vorganges) ⓐ $\hat{u}_{\ddot{u}max} = \text{MAX}\{\hat{u}_{\ddot{u}}\}$ ⓑ $\hat{u}_{\ddot{u}max}$ für geringe Ereignishäufigkeit bestimmt z.B.: $\hat{u}_{\ddot{u}max} = \hat{u}_{02\ddot{u}}$	① Anwendung von Überspannungsmaßnahmen ② Räumliche Verteilung aller Spannungsbeanspruchungen im Netz mit ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten ⟶ ÜDF ③ VHF der Isolierungen
Vorteile	① Einfache Handhabung u. international standardisierte Pegel ② Nur Begrenzungsverhalten des Überspannungsschutzes erforderlich	① relativ geringe Kenntnisse zur Ü-Beanspruchung und zum Isoliervermögen erforderlich ⓐ Einfache Handhabung international standardisierter Pegel ⓑ pf ≙ Ereignishäufigkeit berechenbar	① Ausfallrisiko quantifizierbar ② ökonomische Isolationsbemessung realisierbar
Nachteile	① Evtl. hohe Durchbruchhäufigkeit bei fehlendem od. ungenügendem Überspa.-Schutz ② Unsicherheiten bei der Wahl von c und im Ausfallrisiko	① Kenntnisse über räumliche $\hat{u}_{\ddot{u}max}$-Verteilung $\hat{u}_{02\ddot{u}}$-Verteilung ⓐ keine ökonomische Isolationsbemessung ⓑ Ausfallrisiko nicht exakt bestimmbar	① Hoher Meß-, Prüf- und Rechenaufwand ② Anwendung auf äußere Isolation begrenzt

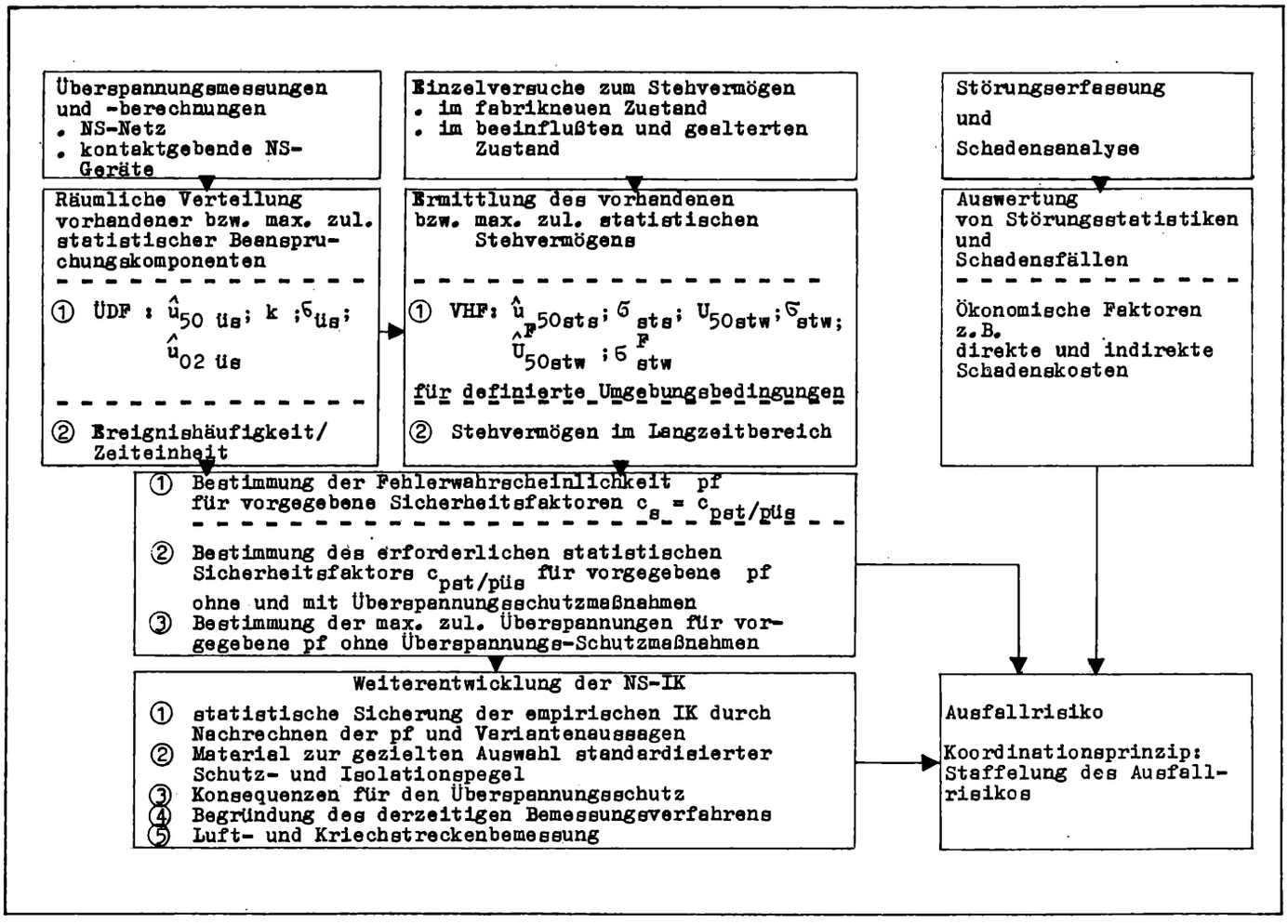


Bild 2. Aktivitäten und Kennwerte zur Weiterentwicklung der NS-Isolationskoordination (NS-IK) bei Einbeziehung einer statistischen Betrachtungsweise
$c_{pst/püs}$ statistischer Blitzspannungs-Sicherheitsfaktor; *pf* Fehlerwahrscheinlichkeit; *k* Überspannungsfaktor; $\hat{u}_{50\,üs}$, $\hat{u}_{02\,üs}$ 50- bzw. 2-%-Blitzüberspannung; $\sigma_{üs}$ Standardabweichung der Blitzüberspannungsverteilung; $\hat{u}_{50\,sts}$ Erwartungswert der VHF bei Blitzspannung; σ_{sts} Standardabweichung der VHF bei Blitzspannung; $\hat{U}_{50\,stw}$, σ_{stw} Erwartungswert und Standardabweichung der Stehwechselspannung; $\hat{U}^{F}_{50\,stw}$, σ^{F}_{stw} Erwartungswert und Standardabweichung der Fremdschicht-Stehwechselspannung

Die vollstatistische Methode wird derzeit im wesentlichen auf die äußere Isolation von Höchstspannungsanlagen angewendet, da an der selbstgenerierenden Isolation noch am ehesten die experimentelle Bestimmung verläßlicher Kenngrößen der Verhaltensfunktionen möglich ist. Als wichtige Hilfsgröße für die Isolationskoordination interessiert neben dem Erwartungswert der Durchbruchspannung die Gesamtstandardabweichung, die u.a. von der Streuung der Durchbruchspannung bei den jeweiligen Umgebungsbedingungen und der Streuung dieser Umgebungsbedingungen abhängt. Die Aufnahme der Verhaltensfunktion erfolgt der Einfachheit halber bei definierten Umgebungsbedingungen.
Die Fehlerwahrscheinlichkeit kann bei Kenntnis der Überspannungsbeanspruchung/Zeiteinheit sowie ökonomischer Kennzahlen zum Ausfallrisiko erweitert werden, wobei die rationelle Auslegung der Isolierungen für das Minimum an Installationskosten, jährlichen Abschreibungskosten und den jährlichen Schadenskosten für die Störungsbeseitigung und den Produktionsausfall erfolgt. Ökonomische Kennzahlen zum Risiko sind somit an die Kenntnis der durchschnittlich zu erwartenden Anzahl von Isolationsfehlern je Jahr und der geschätzten Kosten bei einem Isolationsfehler geknüpft. Im Gegensatz zum statistischen Sicherheitsfaktor hat das Ausfallrisiko eine physikalische Bedeutung. Der entscheidende Vorteil der statistischen Methode besteht deshalb darin, die Sicherheitspegel der verschiedenen Teile eines Netzes nach den Folgen eines Fehlers zu koordinieren, d.h., sie ermöglicht Risikoentscheidungen. Darüber hinaus lassen sie Empfindlichkeitsanalysen über den Einfluß einer Änderung in der Gefährlichkeit der Überspannung und/oder dem Stehvermögen der Isolierung auf die Fehlerwahrscheinlichkeit zu.

3. Aktivitäten und Kennwerte zur Einbeziehung einer statistischen Betrachtungsweise in die NS-Isolationskoordination

Im Bild 2 sind die notwendigen Aktivitäten und Kennwerte zu einer auf statistischen Betrachtungen basierenden deterministischen Isolationskoordinaten zusammengestellt. Die Fülle der Einzelaufgaben und erforderlichen Voraussetzungen läßt die Vielschichtigkeit der Aufgabe erkennen.
Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet die wahrscheinlichkeitsorientierte Analyse der Einflußgröße von Spannungsbeanspruchung und Isoliervermögen mit dem Ziel, statistische Kennwerte der Spannungsbeanspruchung durch transiente Überspannungen mit und ohne Überspannungsschutzeinrichtungen sowie des Isoliervermögens zu ermitteln. Mit der Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit für vorgegebene Überspannungsdichtefunktionen in Abhängigkeit von der Wahl des Abstandes zur Verhaltensfunktion bei Variation der Kennwerte beider Funktionen werden keine Absolutwert- sondern Varianteaussagen angestrebt. Der Absolutwert der Fehlerwahrscheinlichkeit interessiert nur im Zusammenhang mit der Abschätzung des Einflusses einer definierten Kennwertänderung bei gleichzeitigem Konstanthalten aller übrigen Kenngrößen. Hieraus können auch allgemeingültige Schlußfolgerungen für die Genauigkeitsforderungen bei der Kennwertermittlung gezogen werden. Durch Berechnung statistischer Blitzspannungssicherheitsfaktoren für charakteristische Fehlerwahrscheinlichkeiten sind im Vergleich mit empirischen Sicherheitsfaktoren die zu den Isolationspegeln nach TGL 20445/03 [1] gehörenden Durchbruchwahrscheinlichkeiten bestimmbar. Zur Abschätzung des Ausfallrisikos sind zusätzlich Annahmen zur Ereignishäufigkeit/Zeiteinheit zu treffen.

Nach Vorgabe einer definierten Überspannungsbeanspruchung — z.B. in Höhe der Nenn-Stehblitzspannung, des Schutzpegels oder mit definiertem Überspannungsfaktor — lassen sich die Stehblitzspannungen in Abhängigkeit von der Nennspannung berechnen. Der Vergleich der statistischen Stehblitzspannungen mit den Nenn-Stehblitzspannungen für definierte Fehlerwahrscheinlichkeiten sowie die Berechnung der für die Isolationspegel maximal zulässigen bezogenen Überspannungspegel ermöglicht die Bewertung der Koordination gegenüber Blitzimpulsspannung. Konsequenzen für

die zwingende Anwendung von Überspannungsschutzmaßnahmen ergeben sich für diejenigen Einsatzfälle, bei denen sich bei niedrigen Fehlerwahrscheinlichkeiten größere erforderliche statistische Stehblitzspannungen als die Nenn-Stehspannung bei der jeweiligen Isolationsgruppe und Auswahlspannung ergeben. Hieraus lassen sich Forderungen für den Überspannungsschutz in der NS-Technik ableiten.
Problematischer stellt sich die Koordination gegenüber betriebsfrequenten Wechselspannungen dar. Bei äußeren Isolierungen ist nur eine stark vereinfachte statistische Betrachtungsweise möglich. Sie soll zur Begründung der in der TGL 20445 [1] enthaltenen Nenn-Stehwechselspannungen für Luft- und Kriechstrecken sowie auf die äußere Isolation von NS-Betriebsmitteln bei definierten Umgebungsbedingungen und vorgegebenen Nenn- bzw. Auswahlspannungen angewendet werden.
Besondere Probleme ergeben sich bei der Isolationsbemessung solcher elektrotechnischer Betriebsmittel, deren Ausfallverhalten dominierend vom Alterungsverhalten der Feststoffisolation abhängt und bei denen darüber hinaus bei Beanspruchung mit transienten Überspannungen die Feststoffisolation infolge von Reflexionserscheinungen und nichtlinearer Spannungsverteilung ungleichmäßig beansprucht wird. Hierzu zählen z. B. die Wicklungen von rotierenden elektrischen Maschinen, Transformatoren und Drosselspulen.

4. Schlußfolgerungen für die Weiterentwicklung der NS-Isolationskoordination

Um dem stochastischen Verhalten der Spannungsbeanspruchungen und Begrenzungseinrichtungen sowie dem Isoliervermögen und den Umgebungsbedingungen unter Einbeziehung einer definierten Fehlerwahrscheinlichkeit und ökonomischer Aspekte besser zu entsprechen, ist die Einbeziehung einer statistischen Betrachtungsweise für die Koordination gegenüber Blitzimpulsspannung anzustreben. Das bedeutet beim derzeitigen Kenntnisstand und wegen der im Abschn. 3. genannten Gründe jedoch nicht die Entwicklung des empirischen Verfahrens zur semistatistischen bzw. zur vollstatistischen Isolationskoordination.
Die Anwendung einer verallgemeinerten statistischen Betrachtung nach dem Prinzip der statistischen Methode auf die standardisierten Schutz- und Isolationspegel verspricht folgende Vorteile:

1. Statistische Sicherung der empirischen Isolationskoordination in ihren Basisgrößen durch Nachrechnen der standardisierten Pegelwerte bei Variation unterschiedlicher Einflußgrößen.
2. Bewertung der derzeitigen Koordination gegenüber Blitzimpulsspannungen und Bereitstellung von Material zur gezielten Auswahl der standardisierten Pegelwerte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflußgrößen.
3. Gewinnung von Aussagen zum zwingenden oder wahlweisen Überspannungsschutz in Abhängigkeit von Annahmen zur Überspannungsbeanspruchung und den damit in Zusammenhang stehenden Konsequenzen für die Praxis.

Die vorgeschlagene Verfahrensweise verbindet die Vorteile der empirischen Methode mit dem höheren Aussagewert statistischer Methoden, indem sie auf eine gezielte Auswahl standardisierter Pegelwerte auf der Basis niedriger Fehlerwahrscheinlichkeiten und der damit im Zusammenhang stehenden ökonomischen Vorteile orientiert. Eine Erweiterung der Fehlerwahrscheinlichkeit zum Ausfallrisiko erfordert allerdings die zusätzliche Kenntnis ökonomischer Kennzahlen sowie der Anzahl der Überspannungsbeanspruchungen je Zeiteinheit.

Literatur

[1] TGL 20445/03 Isolationskoordination für Anlagen und Betriebsmittel bis 1000 V. Ausg. Februar 1986
[2] *Naumann, W.; Friedberg, R.:* Isolationskoordination für Anlagen und Betriebsmittel mit Nennspannungen bis 1000 V — Zur Neuausgabe von TGL 20445/03. Elektropraktiker, Berlin 40 (1986) 9, S. 292–296
[3] *Naumann, W.; Küttner, H.; Koschinsky, G.:* Überspannungsschutz in Niederspannungsanlagen. Projektierungsvorschrift VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau, Ordn.-Nr. 1.15/10.87
[4] *Koettnitz, H.; Bauer, H.:* Grundlagen, gegenwärtige Anwendung und Weiterführung der Arbeiten zur statistischen Isolationskoordination. ELTRA (1976) 1, S. 1–31
[5] *Koettnitz, H.:* Isolationsbeanspruchung und -bemessung von Hochspannungsenergieanlagen nach dem gegenwärtigen Wissensstand. das verbundnetz 14 (1978) 29/30, S. 702–719
[6] *Bauer, H.:* Beitrag zur Koordination der Isolation auf statistischer Grundlage und ihre Anwendung auf den Schutz gegen Blitzüberspannungen von Mittelspannungsanlagen mit Kabeleinführung. Dissertation. TU Dresden 1973
[7] *Bauer, H.:* Isolationsbemessung auf statistischer Grundlage. das verbundnetz 14 (1978) 29/30, S. 737–742
[8] *Thione, L.:* Spezialbericht 33-00 zu Diskussionsschwerpunkten mit Problemfragen des Studienkomitees 33 „Koordination der Isolation und Überspannungen". CIGRE Konferenz, Paris 1984

EA 5832

Methoden der Zuverlässigkeitssicherung integrierter mikroelektronischer Leitsysteme für VUW 110 kV

B. Buchholz, KDT; E. Kreuzer, KDT; H. Mahnert, KDT; G. Thämelt, KDT; Chr. Tscheschner, KDT; Dresden

1. Integrierte mikroelektronische Leittechnik — ein modernes technisches Konzept

In der DDR wird bereits gegenwärtig ein großer Teil der Umspannwerke in der 110-kV-Verteilungsebene unbesetzt betrieben und aus einer Netzleitstelle mit konventionellen fernwirktechnischen Mitteln überwacht.
Die stürmische Entwicklung der Mikroelektronik in den letzten 10 Jahren eröffnet qualitativ bessere Möglichkeiten für den umfassenden Ausbau der Netzleittechnik und führt bei konsequenter Ausnutzung der Vorteile der Mikroelektronik zur Entwicklung einer neuen technischen Generation, der integrierten mikroelektronischen Leittechnik. Ihre Anwendung für Ziele der fernwirktechnischen Einbindung unbesetzter 110-kV-Umspannwerke in ein Netzleitsystem ermöglicht einerseits die Realisierung klassischer Fernwirkaufgaben, wie Melden, Messen, Steuern, zuverlässig und mit reduziertem Kostenaufwand, andererseits vollführt die neue Generation Leittechnik mit der mikroelektronischen Realisierung der Aufgaben Fernparametrierung, Ferndiagnose und Fernprüfung von Funktionen und Anlagen einen entscheidenden Qualitätssprung, der sich insbesondere aus der zusätzlichen Integration von Aufgaben der Vorortautomatisierung (Regelung, Automatik, Schutz) in das mikroelektronische Leitsystem sowie aus der Selbsterkennung von Fehlern und Ausfällen ergibt. Es kommt zur Effektivitätssteigerung des Mikrorechnereinsatzes, da die Möglichkeiten der eingesetzten Technik maximal ausgenutzt werden. Gleichzeitig kann mit der qualitativ und fernwirktechnisch beeinflußbaren Realisierung verschiedener UW-Automatisierungsfunktionen innerhalb eines redundanten Rechnersystems ein Beitrag zur Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit geleistet werden.
Ein integriertes mikroelektronisches Leitsystem mit den beschriebenen Eigenschaften wurde strukturoptimiert für den in der DDR am weitesten verbreiteten Umspannwerkstyp VUW 110 kV am Institut für Energieversorgung Dresden entwickelt. Zur Basis dieser Neuentwicklung gehören:

— das industriell im Kombinat Elektroapparatewerke produzierte Automatisierungssystem ursadat 5000
— im Rationalisierungsmittelbau in Serie gefertigte, eigenentwickelte Prozeßschnittstellen
— das Betriebssystem EIEX
— das Anwenderprogrammpaket
— der Maßnahmekomplex zum Schutz vor Störbeeinflussungen.

Einen Überblick über die implementierten Funktionen des Systems gibt Bild 1. Einzelheiten zur Funktionsgestaltung sind in [1] beschrieben. Dieses Leitsystem wird in den kommenden Jahren zielgerichtet in den 110-kV-Umspannwerken der DDR eingesetzt werden und bietet die Grundlage für den umfassenden Ausbau der Netzleitsysteme bis in die Verteilungsebene hinein.

Dr.-Ing. *Bernd Buchholz*, Dipl.-Ing. *Eberhard Kreuzer*, Dr. rer. nat. *Hartmut Mahnert*, Dr.-Ing. *Günter Thämelt*, Dipl.-Ing. *Christoph Tscheschner*, Institut für Energieversorgung Dresden.

Die Übertragung von Steuerungs-, Automatisierungs- und Schutzaufgaben elektrischer Netze an das integrierte mikroelektronische Leitsystem stellt dabei eine moderne, international viel diskutierte Herangehensweise dar, denn auf der Basis der konventionellen Technik werden diese Funktionen aus Fertigungs-, aber auch aus Zuverlässigkeitsgründen dezentralisiert mit autonomer Technik realisiert. Der Aufbau integrierter mikroelektronischer Leitsysteme mit hoher Konzentration verschiedener Funktionen und dementsprechend hoher Auslastung und Mehrfachnutzung aller Systemkomponenten zwingt zu umfassenden Überlegungen in Richtung Systemzuverlässigkeit, da ja jeder Ausfall größere Auswirkungen als im Fall der dezentralisierten Technik hat.
Bei der Entwicklung der verfahrenstechnischen Lösung des integrierten mikroelektronischen Leitsystems wurden vielfache Möglichkeiten der Zuverlässigkeitssicherung eingesetzt, worüber im folgenden ein kurzer Überblick gegeben werden soll.

2. Zuverlässigkeit und Systemkonzeption

Grundsätzliche Fragen der Zuverlässigkeitssicherung wurden bei der Festlegung der Systemkonzeption geklärt. Sie geht von den Möglichkeiten des Systems ursadat 5000 aus, bei dem in einer sogenannten Grundeinheit ein Hauptrechner und mehrere auf seinen Bus interruptgesteuert arbeitende Vorverarbeitungsrechner für Rechnerfernkopplung FI (200 bis 1200 bit/s), Rechnernahkopplung ZI (500 kbit/s) und Analogwertverarbeitung AE-DV (maximal 56 Analogeingänge) zusammengefaßt sind. Es werden für das System Netzleitstelle-VUW mindestens vier solche Grundeinheiten (GE) mit folgender Aufgabenteilung eingesetzt (Bild 2):

GE1: Grundeinheit der Netzleitstelle
Aufnahme von Bedienbefehlen, Kodierung und Absenden von Steuertelegrammen an die GE des VUW
Empfang von Telegrammen mit Meldungen, Meßwerten und Zustandsdarstellungen aus den GE des UW, Führen eines Meldespeichers und eines Störspeichers, Informationsdarstellung in der Netzleitstelle, Bedienerkommunikation (Bildschirm, Tastatur, Drucker, Signalisation)
Autodiagnose, Systemdiagnose (anteilig).

GE2/3: Prozeßrechner für den redundant ausgelegten Teil der Funktionen im VUW
GE2 — vorzugsweise Führungsrechner, d.h. aktive Einwirkung auf den Prozeß
GE3 — vorzugsweise redundanter Rechner, d.h. Prozeßeinwirkung ist gesperrt
Prozeßdatenerfassung und -auswertung in Echtzeit, Realisierung von Prozeßsteuerungen, Autodiagnose, Systemdiagnose einschließlich Führungsentscheid, Empfang von Telegrammen mit Steuerbefehlen der GE1, Dekodierung und Ausführung dieser Befehle, Senden von Telegrammen mit kodierten Meldungen, Meßwerten, Zustandsdarstellungen an die GE1, Senden von Telegrammen mit Steuerbefehlen an die GE4, Empfang von Telegrammen mit kodierten Meldungen, Meßwerten und Zustandsdarstellungen von der GE4
Führen des Meldespeichers, Informationsdarstellungen im VUW, Bedienerkommunikation.

GE4: Prozeßrechner für den einfach ausgelegten Teil der Funktionen im VUW
Prozeßdatenerfassung und Auswertung in Echtzeit, Realisierung von Prozeßsteuerungen
Empfang von Telegrammen mit Steuerbefehlen von GE1 und GE2 bzw. GE3, Dekodierung und Ausführung dieser Befehle, Senden von Telegrammen mit kodierten Meldungen, Meßwerten, Zustandsdarstellungen an GE1, GE2 und GE3
Führen von Meßdatenspeichern
Autodiagnose, Systemdiagnose (anteilig).

Mit dieser Aufgabenteilung läßt sich die im Bild 2 dargestellte Rechnerstruktur aus Zuverlässigkeitsgesichtspunkten wie folgt begründen:
Die Grundeinheit 1 in der Netzleitstelle führt keine Echtzeitverarbeitung von Prozeßdaten durch und hat auch keine automatisch einzuleitenden Prozeßsteueraufgaben. Aus diesem Grunde ist bei Forderung des Anwenders nach Redundanz eine kalte Reserve durch die Grundeinheit 0 sinnvoll, die im Normalfall abgeschaltet ist und beispielsweise als Trainer/Simulator genutzt werden kann. Bei Ausfall der Grundeinheit 1 erfolgt durch entsprechende Umschaltung

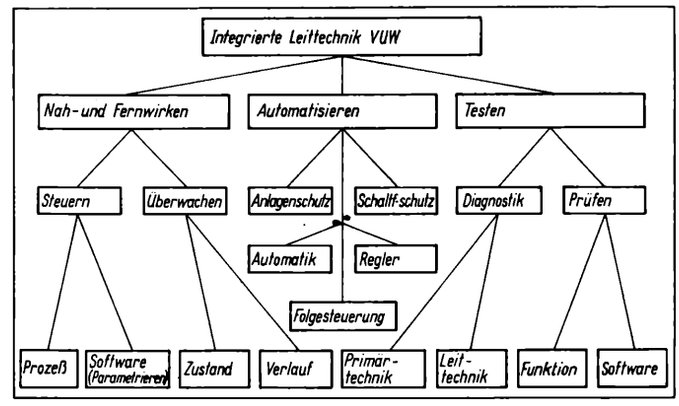


Bild 1. Funktionsübersicht mikroelektronische integrierte Leittechnik für VUW 110 kV

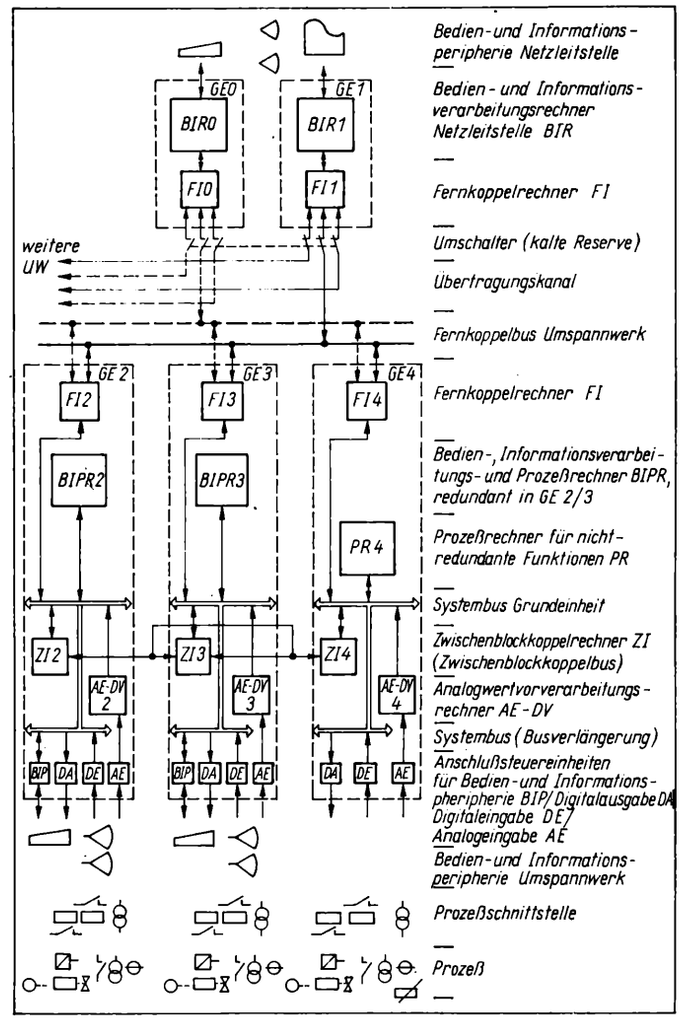


Bild 2. Systemkonzeption mikroelektronische Leittechnik für VUW 110 kV

die Aktivierung der Grundeinheit 0, ohne daß der Prozeß im Umspannwerk beeinträchtigt wird.
Den redundanten Grundeinheiten 2 und 3 werden alle die Funktionen übertragen, deren Ausfall nicht zugelassen wird. Beide Grundeinheiten sind vollständig identisch aufgebaut, wobei einer Grundeinheit die Führung übertragen und die andere in „hot stand by" betrieben wird. Nur die führende Grundeinheit setzt Steuer- und Stellbefehle um. Informationen für den Bediener sind aber auch aus der redundanten Grundeinheit abrufbar.
Es existiert weiterhin eine durch Software realisierte gegenseitige Verriegelung der wirksamen Grundeinheit der Netzleitstelle und der führenden Grundeinheit des Umspannwerkes mit Einstellung auf Vorort- oder Fernsteuerung, so daß immer nur von einem definierten Arbeitsplatz aus Steuerhandlungen ausgeführt werden können, die unmittelbare Einflußnahme auf den energetischen Prozeß haben.

Funktionen, deren Ausfall keine schwerwiegenden Folgen hat, werden in die Grundeinheit 4 verlagert, für die keine Redundanz vorgesehen ist. Das betrifft insbesondere Bedienung und Meldungen der Mittelspannungsabgänge, die Verarbeitung von Normalbetriebsmeßwerten und Regelfunktionen (beispielsweise Kompensationsgradregelung in kompensierten Netzen).
Systemkonzeptionelle Maßnahmen zur Sicherung hoher Zuverlässigkeit sind weiterhin:

— konsequente Potentialtrennung der Prozeßaus- und -eingangskreise der Grundeinheit von den Steuer- und Geberkreisen des Umspannwerkes
— spezielle Erdungs- und Blitzschutzkonzeption des Rechnersystems
— ausfallsichere Stromversorgung der Rechner, dabei Unabhängigkeit der Stromversorgung der Grundeinheiten 2 und 3.

Das vorgestellte System wurde auf der Grundlage statistischer Ausfalldaten, die vom Entwickler der ursadat 5000 ständig erfaßt und ausgewertet werden [2], auf Ausfallsicherheit untersucht. Diese statistischen Ausfalldaten für die ursadat 5000 liegen wesentlich über den Garantiewerten des Herstellers. Sie beziehen sich auf irreversible Fehler, die nur durch Hardwareinstandsetzungen beseitigt werden und auf reversible Fehler, die softwaremäßig zu beherrschen sind.
Unter Beachtung der statistischen Ausfalldaten für irreversible Fehler sowie einer mittleren Hardwareinstandsetzungszeit von 48 h liegt die mathematische Erwartung für den Ausfallabstand des Rechnersystems GE2/GE3 bei über 100 Jahren.
Dieser Wert ist genau dann berechtigt, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Reversible Fehler werden softwareseitig mit Auto- und Systemdiagnose beherrscht.
2. Umspannwerksspezifische Beeinflussungen führen nicht zu zusätzlichen Ausfällen und Fehlern, so daß die für die Berechnung verwendeten statistischen Daten auch unter Umspannwerksbedingungen gelten.

3. Autodiagnose

Für jede Grundeinheit werden sowohl seitens der Hardware als auch softwareseitig umfassende Autodiagnoseaufgaben gelöst. Der Entwickler der ursadat 5000 sieht geeignete Steckeinheiten vor, die spezielle Fehler mit Interrupt signalisieren:

— Netzausfallanalysator
— Stromversorgungsüberwachungen für alle internen Spannungen
— Bussignalüberwachung
— Temperaturüberwachung.

Rein softwareseitig werden realisiert:

— Speichertest (ROM, RAM)
— Plausibilitätstest in den Programmen
— Parametervergleichstest.

Die programmtechnische Behandlung der durch Hardware festgestellten Fehler ist spezifisch für die Erfordernisse des Umspannwerkbetriebes und der Systemkonzeption entsprechend ausgeführt. Bei Netzausfall beispielsweise wird der Rechner in einen 80-ms-Wartezyklus geführt, wonach geprüft wird, ob der Rechnerbetrieb fortgesetzt werden kann. Gegebenenfalls übernimmt der redundante Rechner die Führung. (Die redundanten Rechner werden unabhängig voneinander akkumulatorgestützt gespeist.) Alle Speicherbausteine einer Grundeinheit, d.h. sowohl die Speicher des Hauptrechners als auch der untergeordneten Rechner (FI, ZI, AE-DV), werden Speichertests (ROM, RAM) unterzogen.
Das geschieht in einem Programm niedrigster Priorität, das ständig dann abgearbeitet wird, wenn keine anderen Anforderungen anstehen. Der ROM-Test erfolgt für jeden 1-kByte-EPROM-Baustein einzeln. Es wird eine Polynomdivision durch den irreduziblen Anteil des HDLC-Polynoms durchgeführt. Dabei erhält man einen bestimmten CRC-Rest von 2 Byte Länge, der mit dem ursprünglichen, vor Inbetriebnahme des Rechners bestimmten Wert zu vergleichen ist.
Der RAM-Test wird byteweise als Schreib-Lesetest durchgeführt. Plausibilitätstest für Programmabläufe erfolgen in allen Anwenderprogrammen mit Hilfe von Austrittsüberwachungen.
Die Systemkonzeption behandelt detektierte ROM-, RAM-, Plausibilitäts- und RDY-Fehler (Bussignalüberwachung) durch RESET und Neuanlauf der Grundeinheit und — soweit relevant — automatische Übergabe der Führung an die redundante Grundeinheit.
Werden die o.g. Fehler während der Anlauffehlerüberprüfung erneut festgestellt, wird die fehlerbehaftete Grundeinheit außer Betrieb gesetzt.
Wichtige Parameter, wie Einstellwerte der digital realisierten Schutzfunktionen, Regler und Automatiken, werden prinzipiell in batteriegestützten RAM-Bereichen gespeichert. Damit wird die Möglichkeit erhalten, diese Parameter während des Betriebes zu ändern, ohne daß Einschränkungen in der Häufigkeit der Änderungen (z.B. bei Anwendung von EEPROM der Fall) gemacht werden müssen. Diese Festlegung erfordert umfangreiche Maßnahmen zur Datensicherung, die wie folgt im Rahmen der Autodiagnose realisiert werden.
Die Parameter werden im RAM gedoppelt (komplementär) abgelegt. Die Autodiagnose sieht den Parametervergleich vor. Vergleichsfehler führen zum CRC-Test für den Parameterbereich und zur Regeneration der Parameter, wenn in einem der beiden komplementären Bereiche der Test positiv verlief. Anderenfalls werden die Parameter aus der redundanten Grundeinheit abgefordert. Sollten sie nicht verfügbar oder ebenfalls fehlerbehaftet sein, erfolgt die Übernahme von Standardparametern aus dem ROM.
Die weitere Erhöhung der Zuverlässigkeit des Rechnerbetriebes läßt sich bei Dopplung der Speicherbereiche durch Einsatz einer 64-kByte-Test-RAM-Karte und zweifach geführter Autodiagnose erreichen. Im Normalbetrieb befindet sich der gesamte interne 64-kByte-Arbeitsspeicherbereich des Hauptrechners der Grundeinheit auf der dynamischen RAM-Karte. Es erfolgen der CRC-Test dieses Bereiches analog dem EPROM-Test sowie die Anordnung von Austrittsüberwachungen in allen Programmen. Bei auftretenden Fehlern erfolgt die Ladung des dynamischen RAM aus dem ROM, wonach das Weiterbetreiben der Grundeinheit geprüft wird.
Zusätzlich erfolgen auch zyklische Tests der EPROM-Bausteine, die die Software resistent speichern. Auftretende EPROM-Fehler werden erkannt und gemeldet. EPROM-Fehler führen somit nicht zum Ausfall der Grundeinheit, so lange der Speicherinhalt auf RAM plausibel ist. Von dieser Verfahrensweise wird eine weitere Erhöhung der Zuverlässigkeit erwartet, weil insbesondere ein großer Anteil der Rechnerausfälle auf EPROM-Fehler zurückzuführen ist.
Soweit die Möglichkeiten noch gegeben sind, erfolgen in den Fällen, in denen im Rahmen der Autodiagnose der Grundeinheit Fehler detektiert werden, die Speicherung des Fehlerkennzeichens in speziellen komplementär eingerichteten Zustandsbytes sowie die Formierung aussagefähiger Diagnosemeldungen. Ist die Grundeinheit nicht mehr in der Lage, den eingetretenen Fehler zu melden, erfolgt die Fehlerdetektierung durch die Systemdiagnose.

4. Systemdiagnose

Im Rahmen der Systemdiagnose erfolgen Überwachungen des folgerichtigen Betriebes und der Korrespondenzen der Grundeinheiten untereinander. Die Systemdiagnose enthält:

— Prüfung der Koppelrechner und Koppelkanäle
— Datensicherung auf den Koppelkanälen mit zyklischen Kodes
— zeitliche Überwachung der Grundeinheiten
— gegenseitiges Führen der Zustandsabbilder (Fehlerkennzeichen) der Grundeinheiten
— zyklische Auswertung der Zustandsabbilder der Grundeinheiten 2 und 3 und automatische Übertragung der Führung bei Erfordernis.

Die Prüfung des Zustandes der Koppelrechner und Koppelkanäle erfolgt über Sendung und Empfang von Prüfbitmustern.
Die Verwendung zyklischer Kodes zur Datensicherung (Cycling Redundancy Check) auf allen Koppelkanälen ist (ebenso wie bei den EPROM-Bausteinen) ein wirksames und einfaches Mittel zur Fehlererkennung [3].
Diese Methode besteht darin, jeder Nachricht mit n Bits eine Prüfnachricht aus p Bits hinzuzufügen, wobei die Prüfnachricht beim Sender nach bestimmter Vorschrift aus der n-bit-Nachricht gebildet wird. Da der Empfänger die gleiche Prüfnachrichtenbildung anwendet, kann er die Plausibilität der empfangenen Nachricht testen. Bei negativem Testergebnis wird die Wiederholung der Nachrichtenübertragung eingeleitet.
Durch optimale Wahl der Vorschrift der Prüfnachrichtenbildung wird erreicht, daß die Wahrscheinlichkeit der Nichterkennung von Fehlern mindestens bei 10^{-5} liegt [3].
In der zeitlichen Überwachung einer Grundeinheit wird eine Watchdogzelle in der überprüfenden Grundeinheit hochgezählt, die von der überprüften Grundeinheit im gleichen Zyklus wieder rückzusetzen ist. Dieses Überwachungsprogramm läuft zyklisch in allen

Grundeinheiten des UW ab. Erreicht die Watchdogzelle einen Grenzwert, wird auf den Ausfall der entsprechenden Grundeinheit geschlossen, und es werden entsprechende Behandlungsroutinen eingeleitet. Innerhalb des zyklischen Überwachungsprogrammes werden die das Zustandsabbild führenden sogenannten Systemzellen aktualisiert. Diese Systemzellen sind ebenso wie die wichtige Parameter speichernden Zellen (siehe Autodiagnose) komplementär angelegt. Nach dem Plausibilitätstest der Systemzellen erfolgt durch ihre Gegenüberstellung und die Auswertung einer Entscheidungsmatrix die Festlegung von Führung und Redundanz der Grundeinheiten 2 und 3.
Das komplexe Diagnosesystem hat sich im Verlaufe des bisherigen Probebetriebes des mikroelektronischen Leitsystems bewährt.

5. Spezielle Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Eine Reihe spezieller Untersuchungen erbrachte den Nachweis, daß die in Abschn. 2. erläuterten systemkonzeptionellen Maßnahmen voll wirksam werden und auch unter Umspannwerksbedingungen die Systemzuverlässigkeit garantieren. Neben den im Auftrag des Entwicklers der ursadat 5000 mit Erfolg durchgeführten Industrieerprobungen der Einplatinenrechner FI, ZI und AE-DV sowie den Tests der eigenentwickelten Prozeßschnittzellen (Thyristoransteuerschaltung, Analogsignalwandler, Trafostufenstellungsrückmeldung) sind insbesondere folgende Untersuchungen aussagekräftig:

— Langzeiterprobung niederpegliger Signalübertragung in einer 220-kV-Schaltanlage
— Dauertest von Schutzfunktionen im Umspannwerk u.a. auch während der Durchführung von Erdschlußversuchen
— Beeinflussungstest einer kompletten Grundeinheit einschließlich vorgeschalteter Prozeßschnittstellen an einem speziellen Prüfstand nach IEC-Empfehlungen.

Die Langzeiterprobung der niederpegligen Signalübertragung im Umspannwerk ist ausführlich in [4] ausgewertet. An dieser Stelle sei nochmals unterstrichen, daß bei symmetrischen, beidseitig schirmgeerdeten und übertragerkomplettierten Kanälen (400 m quer durch die Freiluftschaltanlage) die Bitfehlerwahrscheinlichkeit besser als 10^{-10} ermittelt wurde. Ihr Einsatz in 110-kV-Umspannwerken ist aus Zuverlässigkeitssicht (Bitfehlerwahrscheinlichkeit) gleichwertig dem Einsatz von Lichtwellenleitern.
Während des 20monatigen Dauertests eines Rechners mit implementierten Schutzprogrammen (Nullstrom-, Nullspannungs-Überstromzeitschutz und Spannungsfehlerprotokoll) in einem 110-kV-Umspannwerk kamen keine Fehlanregungen und Fehlauslösungen durch die digital realisierten Schutzfunktionen vor. Registrierte Erdschlußwischer wurden mit den Aufzeichnungen des Betriebstagebuches verglichen und durch entsprechende Ereignisse belegt. Beeinflussungen im Umspannwerk wurden nicht festgestellt. Aufgetretene Kontaktprobleme an EPROM-Bausteinen konnten nach Auswechslung durch Chips mit vergoldeten Pins beseitigt werden. Während der Durchführung von Erdschlußversuchen (4 mal in UW-Nähe, 2 mal entfernte Fehlerorte) wurden alle Fehler mit hoher Zeitauflösung registriert und die Anregungen richtig gezählt. Die vom Rechner gespeicherten Maximalwerte der Verlagerungsspannung deckten sich mit gemessenen Werten. Das Programm Spannungsfehlerprotokoll erzeugte in allen Fällen einen umfassenden Meldungssatz, der den Verlauf aller drei Leiterspannungen widerspiegelt. Während des Dauertests traten keine Hardwareausfälle auf.
An einer speziellen Prüfanordnung der TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, wurden für eine komplette Grundeinheit einschließlich Prozeßschnittstellen folgende Versuche durchgeführt:

— Unterbrechungen und Absenkungen der Einspeisespannung
— galvanisch, sowohl symmetrisch (Gegentakt) als auch asymmetrisch (Gleichtakt) eingekoppelte positive und negative Störimpulse auf die Netzeinspeisung und auf alle vorgesehenen Varianten der Prozeßankopplung
— kapazitiv asymmetrisch eingekoppelte positive und negative transiente Störimpulse auf alle vorgesehenen Varianten der Prozeßankopplung
— elektrostatische Entladungen am Gehäuse.

Die Prüfbedingungen sind der Tafel 1 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, daß diese Prüfbedingungen einen Härtetest für den Mikrorechner darstellen. Um so positiver ist das Ergebnis der Versuche zu werten, da trotz dieser schwerwiegenden Beeinflussungen keine Hardwareausfälle (irreversible Fehler) auftraten. Festgestellte reversible Fehler führten in keinem Fall zum Ausfall der ursadat. In Auswertung der Versuche konnten diese Fehler durch spezielle Softwaregestaltung und zusätzliche Entstörungsmaßnahmen an Überwachungsbausteinen noch vor Inbetriebnahme des ersten mikroelektronischen Leitsystems in einem Umspannwerk abgebaut werden.

Tafel 1. Störfestigkeitsprüfungen für ursadat 5000 mit Prozeßankopplung

Störungsart	Störparameter	Prüfbedingungen
1. Netzleitungsstörungen		
1.1. Spannungsamplitude	85 – 110 % U	Dauerbetrieb
1.2. Spannungsabsenkung	100 %; 0,01 s	Abstand 10 s
1.3. Spannungsabsenkung	50 %; 0,02 s	Abstand 10 s
1.4. Spannungsabsenkung	20 %; 0,05 s	Abstand 10 s
1.5. Impulsspannung	5/100 ns; 10 Hz 500 V	beide Polaritäten; Zufallsphasenlage;
1.6. Impulsspannung	25/1000 ns; 10 Hz; 1500 V	Quellimpedanz 50 Ω; symmetrisch;
1.7. Impulsspannung	1 MHz-cos; 10 Hz; 1500 V	Asymmetrisch; Ankoppelnetzwerk
1.8. Impulsspannung	5/50 ns; 5 kHz 500 V – Klasse 1 1000 V – Klasse 2 2000 V – Klasse 3	50 µH (1 kHz)
1.9. HF-Spannung	150 kHz – 300 MHz; 1 V	Quellimpedanz 50 Ω; NNB 50 µH/50 Ω; symm. und asymmetrisch
2. Elektrostatische Entladung	2000 V-Klasse 1 4000 V-Klasse 2 8000 V-Klasse 3	Stromimpuls 5/30 ns Abstand 1 s
3. Signalleistungsstörung		
3.1. Impulsspannung (Galvanische Einkopplung)	Entsprechend 1.5. – 1.8.	Entsprechend 1.5. – 1.8.
3.2. Impulsspannung (Kapazitive Einkopplung)	Entsprechend 1.5. – 1.8.	Kopplungszange
3.3. HF-Spannung	Entsprechend 1.9.	Entsprechend 1.9.
3.4. Impulsspannung	50/500 ns; 60 V	Quellimpedanz 75 oder 300 Ω

Einkoppelarten	
1. Symmetrische Einkopplung (Gegentakt)	L1-N
2. Asymmetrische Einkopplung (Gleichtakt)	L1/N-PE
3. Unsymmetrische Einkopplung (Leiter)	L1-PE
4. Unsymmetrische Einkopplung (Neutralleiter)	N-PE

6. Zusammenfassung

Auf der Basis der geschilderten Systemlösung werden in den kommenden Jahren verstärkt mikroelektronische integrierte Leitsysteme in 110-kV-Umspannwerken eingesetzt. Diese aus mehreren Mikrorechnern bestehenden Systeme üben neben eigentlichen Fernwirkaufgaben eine Vielzahl weiterer Funktionen aus. Mit minimiertem Investkostenaufwand läßt sich auf dieser Grundlage eine sehr komfortable Betriebsführung auf höherem Qualitätsniveau gestalten.
Für den Anwender der integrierten mikroelektronischen Leittechnik werden insbesondere folgende Vorteile wirksam:

— Erhöhung des fernwirktechnisch steuer- und überwachbaren Funktionsumfangs
— Erweiterung der Diagnose- und Prüfmöglichkeiten
— Automatische Auswertung von Meßwerten und Erstellung entsprechender Protokolle
— Geordnete Auswertung von Prozeßereignissen mit Zeitauflösungen bis 10 ms
— Einsatz einer einheitlichen Gerätetechnik für eine Vielzahl von Funktionen.

Diese und weitere Vorteile ermöglichen schnelle und sichere Reaktionen besonders in Störungsfällen, erweiterte Auswertbarkeit von Prozeßabläufen, insbesondere im Hinblick auf die Optimierung der Instandhaltung, Reduzierung der Anfahrten des UW für Routinearbeiten, Senkung des Wartungsaufwandes, erhebliche Verringerung des Aufwandes bei Änderungen von Einstellwerten und Zu-

Qualimetrische Eigenschaftsbewertung von Edelmetall-Kontaktwerkstoffen und -Halbzeugen für Schwachstromanwendungen. Teil 2

G. Bär, KDT; G. Weber; Freiberg

Mitteilung aus dem VEB Bergbau- und Hüttenkombinat „Albert Funk" Freiberg, Direktionsbereich Forschung

Die folgende QEB-Methodik wurde unter Berücksichtigung der ASMW-VW 1486 [11] entwickelt und entspricht in ihren Grundzügen der Bewertungsmethode „Erfüllungsgrad" des Instituts für Leichtbau Dresden [13]. Gesichtspunkte der qualimetrischen Sicherheitsbewertung in der Elektroenergietechnik wurden ebenfalls beachtet [20].

3. QEB von Edelmetallerzeugnissen

Das Grundprinzip besteht darin, aus den nach BN und BM gewichteten PE eine NKZ zu berechnen, die das vom Erzeugnis erreichte relative Niveau der betrachteten funktionellen Eigenschaft auf einer Bewertungsskale festlegt. Die NKZ mitgeprüfter Standards sind dabei notwendige Vergleichs- und Bezugswerte.
Das Verfahren besteht aus den Arbeitsschritten

— Festlegung des Bewertungsfeldes (vor Beginn der AMP)
— Festlegung des Wichtungsmodus und der Wichtungsfaktoren für die PE
— Berechnung der Ergebnissumme
— Festlegung der Extremal-Ergebnissummen, der Maßstabsfaktoren und der Niveauskale (das sollte zweckmäßigerweise ebenfalls vor der AMP erfolgen, gegebenenfalls sind Vorprüfungen notwendig)
— Berechnung der NKZ.

Die methodische Abfolge zeigt Bild 3.

3.1. Bewertungsfeld

BN und BM grenzen im Sinne der QEB das Bewertungsfeld **A** ab, in dem alle Kombinationen $[v_i, d_j]$ liegen, zu denen PE gewonnen werden.
Das Bewertungsfeld ist vor Aufnahme der AMP mit den Erzeugnisentwicklern, -prüfern und -anwendern abzustimmen. Aus den jeweils vorhandenen prüftechnischen Möglichkeiten sind die BN/BM auszuwählen, die für Entwicklung und Applikation am aussagefähigsten sind. Die weitgehende Anlehnung an die Prüfbedingungen der Finalerzeugnisse ist empfehlenswert, die Übernahme von Bewertungsbedingungen in die AMP in Einzelfällen möglich. Das auf diese Weise festgelegte Bewertungsfeld erfüllt die Forderungen in [11] an die charakterisierenden Merkmale und Kenngrößen.
Wegen der schon erwähnten stochastischen Eigenschaften der wesentlichen Kontaktparameter sind verschiedene Zuordnungen von BM und PE möglich (Tafel 1; s. Teil 1):

1. BM sind Schranken (Festwerte) von Zufallsgrößen, PE die zugehörigen Unter- oder Überschreitungswahrscheinlichkeiten (-häufigkeiten) (Bild 1; s. Teil 1)
2. BM sind Wahrscheinlichkeiten (relative Häufigkeiten), PE die zugehörigen Quantile
3. BM sind Momente (z. B. Erwartungswert) oder andere Verteilungsparameter, PE die entsprechenden Schätzwerte.

Die QEB ist streng genommen nur für das vorgegebene Bewertungsfeld gültig, die NKZ sind nicht invariant gegen dessen Änderung. Schlußfolgerungen über das Bewertungsfeld hinaus sind bedingt möglich, können aber zu Fehlaussagen führen:

— Mit Variation des BN ändert sich quantitativ und oft auch sprungartig qualitativ das Verhalten des Erzeugnisses. Typisches Beispiel ist der RK-Zusammenbruch an kontaminierten Oberflächen durch Frittung.
— Die meisten Kontaktparameter sind linkssteil verteilt (z. B. RK wegen $0 \leqq r \leqq \infty$). Deshalb kann die Aussagekraft der gewählten BM unterschiedlich sein.

Hieraus ergibt sich die Forderung, die PE nach den zugehörigen BN und BM wichten zu können.

3.2. Wichtung der PE

Die Wichtung ermöglicht, PE unterschiedlich stark — nach ihrer Lage im Bewertungsfeld — in der NKZ-Berechnung zu berücksichtigen. Die zahlenmäßige Festlegung der Wichtungskoeffizienten hängt von der Art der Erzeugnisse, der funktionellen Eigenschaft und von den BM ab und erfordert im Sinne einer objektiven Wichtung die enge Zusammenarbeit aller Wissensträger und gegebenenfalls Expertenbefragungen [11] [20].
Sind

w_{vi} die Gewichte der Belastungsniveaus v_i und

w_{dj} die Gewichte der Bewertungsmerkmale d_j,

dann ist

$$w_{ij} = w_{vi} \cdot w_{dj} \tag{6}$$

der Wichtungsfaktor für das Prüfergebnis x_{ij} mit

$$\sum_{i=1}^{m} w_{vi} = 1; \quad \sum_{j=1}^{n} w_{dj} = 1; \quad \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} = 1. \tag{7}$$

Die NKZ wird aus den Produkten $w_{ij}\, x_{ij}$ berechnet (vgl. [11] [12]).
Es sind 2 Wichtungsmodi anwendbar:

1. Konstantwichtung: Alle PE gehen gleichwertig in die NKZ ein. Die Gewichte betragen

$$w_{v1} = w_{v2} = \ldots = w_{vm} = 1/m \text{ und/oder } w_{d1} = w_{d2} = \ldots = w_{dn} = 1/n. \tag{8}$$

Dr.-Ing. *Gerd Bär* ist Gruppenleiter, Dipl.-Ing. *Gerd Weber* Ingenieur für Forschung und Entwicklung in der Haupttechnologie Werkstoffe und Verarbeitung des VEB Bergbau- und Hüttenkombinat „Albert Funk" Freiberg.

Teil 1 siehe ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 7, S. 264–266

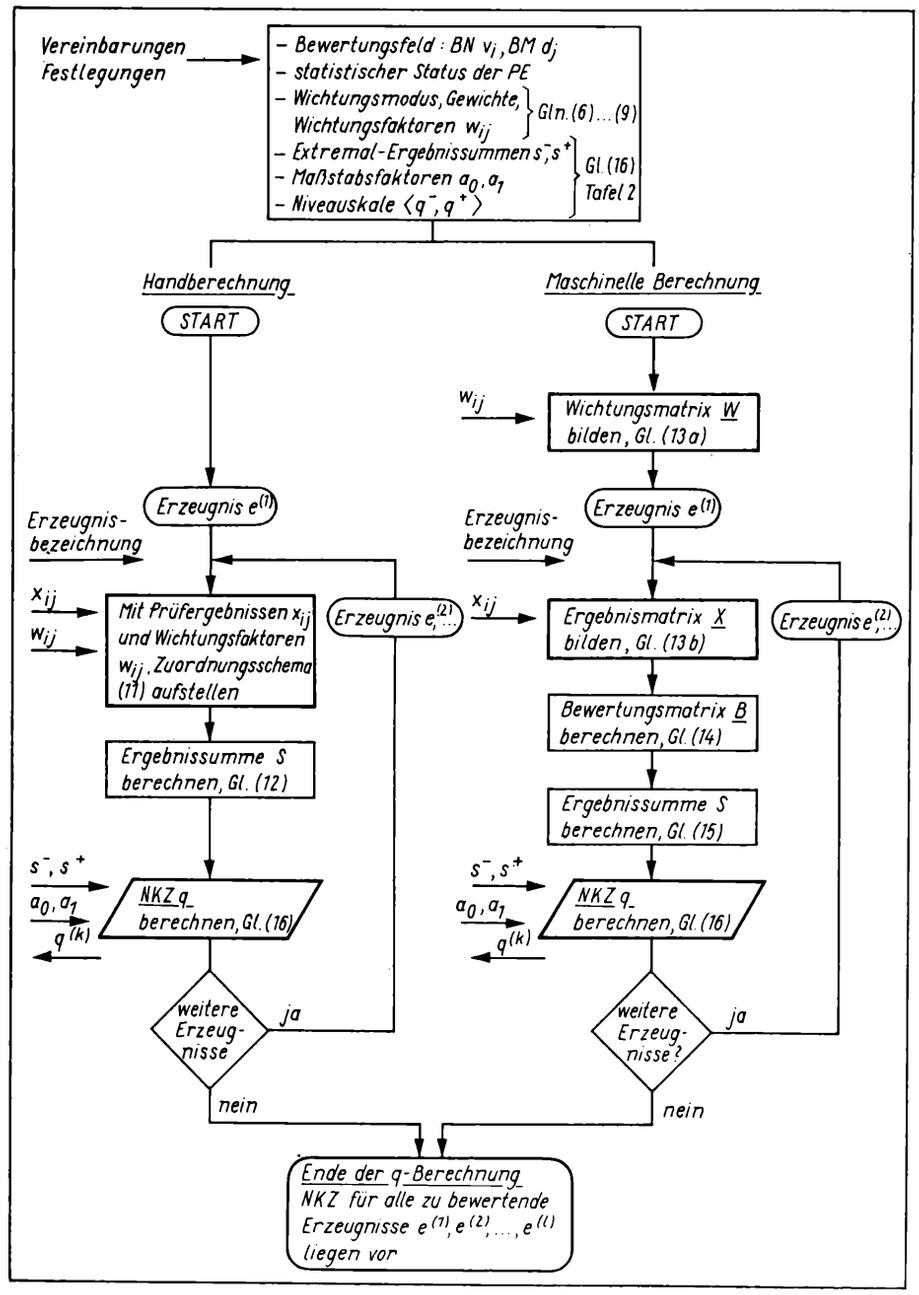
ordnungen für Regler, Schutzeinrichtungen und Automatiken u. v. a.
Die Konzentration verschiedener Funktionen innerhalb eines Rechnersystems erfordert andererseits aber neue Überlegungen zur Sicherung der Systemzuverlässigkeit, da aus zuverlässigkeitstheoretischer Sicht eine Verteilung der Funktionen auf autonome Anlagen von Vorteil ist.
Die Anwendung programmierbarer Technik für integrierte Systeme bietet jedoch neuartige Möglichkeiten zur Zuverlässigkeitssicherung durch umfassende interne Überwachung aller Grundfunktionen (auf Ausfall, aber auch Störungen) und eine automatische Umschaltung auf redundant verfügbare Einheiten. Die verbliebenen Möglichkeiten von unerkannten Ausfällen sind gegenüber einer dezentralen Technik entscheidend verringert.
Mit systemkonzeptionellen Überlegungen sowie mit einem umfassenden System der Auto- und Systemdiagnose wird ein wahrscheinlicher mittlerer Ausfallabstand der wichtigsten Funktionen des Leitsystems über 100 Jahre mathematisch nachgewiesen, was als ausreichend für die Betriebsführung unbesetzter 110-kV-Umspannwerke angesehen wird. Spezielle Untersuchungen bestätigten die Wirksamkeit der angewendeten Methoden der Zuverlässigkeitssicherung. Der nunmehr länger als ein Jahr dauernde, erfolgreiche Betrieb des ersten 110-kV-VUW bestätigt das Zuverlässigkeitskonzept.

Literatur

[1] *Buchholz, B.; Mahnert, H.; Thämelt, G.:* Automatisierte Betriebsführung vereinfachter 110-kV-Umspannwerke auf der Basis von Mikrorechnersystemen. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 7, S. 245–248
[2] *Grimm, W.; Muth, W.:* Zuverlässigkeitsbericht zur Datenrückmeldung gemäß Erprobungsprogramm ursatron 5000. KEAW, Berlin (1985)
[3] *Münchrath, R.:* Datensicherung auf Übertragungswegen mit zyklischen Codes. ELEKTRONIK (1976) 8, S. 55–59
[4] *Mahnert, H.; Thämelt, G.; Kreuzer, E.:* Feldversuche zum Einsatz von Mikrorechnern in Umspannwerken. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 12, S. 640–643

EA 5767

Bild 3. Arbeitsablauf der QEB



2. Proportionalwichtung: In vielen Fällen ist eine den BN und/oder BM proportionale Wichtung zweckmäßig. Das Gewicht des k-ten BM lautet bei n Bewertungsgrößen

$$w_{dk} = \frac{d_k}{\sum_{j=1}^{n} d_j}$$

$$j = 1, 2, \ldots, k, \ldots, n$$

$$k \leqq n. \qquad (9)$$

(Proportionalwichtung nach den BN analog.)

Die Proportionalwichtung hat sich u.a. bei Umgebungsprüfungen mit nachfolgenden RK-Messungen bewährt [21]. Wird die Korrosionsfestigkeit durch die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von RK = 10, 20, 50, 100 und 1000 mΩ quantifiziert, betragen die Gewichte

d	RK = 10	20	50	100	1000 mΩ
w_d bei Konstantwichtung	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
w_d bei Proportionalwichtung	0,009	0,017	0,042	0,085	0,847

Bei der Proportionalwichtung beeinflussen die RK-Überschreitungen das Bewertungsergebnis, differenziert nach ihrer Aussagefähigkeit zur Korrosionsbeständigkeit. Insbesondere werden die 1-Ω-Überschreitungen wesentlich stärker berücksichtigt als bei Konstantwichtung.

Beide Wichtungsmodi können kombiniert werden, z.B. Konstantwichtung nach den BN und Proportionalwichtung nach dem BM. Im übrigen geben die Arbeiten [15] (Wichtungsfaktoren), [16] (Bedeutungsfaktoren) und [20] (Wichtungskoeffizienten) Hinweise, die auch für die QEB von Interesse sind.

3.3. Ergebnissumme

Bei allen qualimetrischen Bewertungsverfahren gehen die PE, Kenngrößen oder Leistungsziffern additiv (als sogenannte Ergebnissumme [10]) in die NKZ ein [10] bis [13] [20]. Das Prüfergebnis $x_{ij}^{(k)}$ ist im dreidimensionalen V, D, $X^{(k)}$-System (Bild 1, s. Teil 1) durch den Ortsvektor

$$\vec{x}_{ij}^{(k)} = v_i \cdot \vec{a}_V + d_j \cdot \vec{a}_D + x_{ij}^{(k)} \cdot \vec{a}_X \qquad (10)$$

eindeutig festgelegt ($\vec{a}_V$, $\vec{a}_D$, $\vec{a}_X$ sind Einheitsvektoren). Die Lage des Aufpunkts $x_{ij}^{(k)}$ im Bewertungsfeld A ist durch die Koeffizienten w_{vi} und w_{dj} gewichtet. Damit läßt sich für jedes Erzeugnis das Zuordnungsschema (11) aufstellen[1]):

[1]) Der hochgestellte Index (k) wird im folgenden der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

	$j \rightarrow$		1	2	$\cdots$	n	Zeilensummen $\sum_{j=1}^{n}$
	$\downarrow i$		d_1	d_2	$\cdots$	d_n	
			w_{d1}	w_{d2}	$\cdots$	w_{dn}	
1	v_1	w_{v1}	$w_{11}\,x_{11}$	$w_{12}\,x_{12}$	$\cdots$	$w_{1n}\,x_{1n}$	$w_{1j}\,x_{1j}$
2	v_2	w_{v2}	$w_{21}\,x_{21}$	$w_{22}\,x_{22}$	$\cdots$	$w_{2n}\,x_{2n}$	$w_{2j}\,x_{2j}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			$\cdots$		
m	v_m	w_{vm}	$w_{m1}\,x_{m1}$	$w_{m2}\,x_{m2}$	$\cdots$	$w_{mn}\,x_{mn}$	$w_{mj}\,x_{mj}$
Spaltensummen $\sum_{i=1}^{m}$			$w_{i1}\,x_{i1}$	$w_{i2}\,x_{i2}$	$\cdots$	$w_{in}\,x_{in}$	$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\,x_{ij}$

(11)

Die Ergebnissumme S wird

— unmittelbar aus (11) oder
— nach dem Matrizenverfahren

berechnet.

Die Spalten- und Zeilensummen in (11) ergeben die Ergebnissumme zu

$$S = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\,x_{ij}. \tag{12}$$

Gleichung (12) ist bei manueller Berechnung dann vorteilhaft, wenn nur wenige Erzeugnisvarianten bei kleiner Anzahl von BM zu vergleichen sind. Werden die PE in der Form (11) gespeichert, kann S auch von Hand recht schnell ermittelt werden. Für umfangreichere Auswertungen wird das Matrizenverfahren empfohlen.

Aus dem Schema (11) sind eine Wichtungsmatrix $\underline{W}$ und die PE-(Ergebnis-)Matrix $\underline{X}$ ableitbar:

$$\underline{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ & & \cdots & \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mn} \end{bmatrix} \tag{13a}$$

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ & & \cdots & \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{13b}$$

$\underline{W}$ und $\underline{X}$ sind (m, n)-Matrizen: Die Zeilen entsprechen den BN v_i, die Spalten den BM d_j, Matrizenelemente sind die Wichtungskoeffizienten und die PE.

Die Multiplikation von transponierter Wichtungsmatrix und PE-Matrix ergibt die Bewertungsmatrix $\underline{B}$:

$$\underline{B} = \underline{W}^T \cdot \underline{X}. \tag{14a}$$

Sie enthält in der Hauptdiagonale die gültigen Lösungen für die Ergebnissumme (in Gl. (14b) unterstrichen).

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \underline{w_{11}\,x_{11} + \cdots + w_{m1}\,x_{m1}} & w_{11}\,x_{12} + \cdots + w_{m1}\,x_{m2} & \cdots & w_{11}\,x_{1n} + \cdots + w_{m1}\,x_{mn} \\ w_{12}\,x_{11} + \cdots + w_{m2}\,x_{m1} & \underline{w_{12}\,x_{12} + \cdots + w_{m2}\,x_{m2}} & \cdots & w_{12}\,x_{1n} + \cdots + w_{m2}\,x_{mn} \\ & & \cdots & \\ w_{1n}\,x_{11} + \cdots + w_{mn}\,x_{m1} & w_{1n}\,x_{12} + \cdots + w_{mn}\,x_{m2} & \cdots & \underline{w_{1n}\,x_{1n} + \cdots + w_{mn}\,x_{mn}} \end{bmatrix} \tag{14b}$$

S ist die Summe der Hauptdiagonalelemente:

$$S = \sum_{\substack{i=1 \\ k=1}}^{m} b_{ik\,(i=k)}. \tag{15}$$

Das Matrizenverfahren ist für rechnergestützte QEB günstig, wenn die Wichtungsmatrix extern gespeichert und beliebig oft abrufbar ist. Die PE müssen so eingegeben werden, daß die PE-Matrix in der richtigen Weise entsteht. Dadurch können auch umfangreiche, in Zeitabständen durchzuführende Bewertungen rationell abgearbeitet werden.

3.4. Niveauskale, Berechnung der NKZ

Die Bewertungsskale ist an einen funktionellen Zusammenhang zwischen NKZ und Ergebnissumme S gebunden. Dieser Zusammenhang ist problem- und erzeugnisorientiert und üblicherweise linear [10] bis [13] [20]. Die Niveauskale, eine Konventionalskale, lautet allgemein:

$$\left.\begin{matrix}\text{Schlechtestverhalten} \\ \text{Relatives Niveau von } \mathbf{Z} \\ \text{Bestverhalten}\end{matrix}\right\} \triangleq \begin{bmatrix} q^- \\ q \\ q^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & a_1 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & a_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ s^- \\ S \\ s^+ \end{bmatrix} \tag{16}$$

s^-, s^+ sind Extremal-Ergebnissummen, a_0, a_1 Maßstabsparameter. Sie fixieren über ihre Verknüpfung mit q^- und q^+ die Niveauskale.

Die Extremalsummen repräsentieren

— untere und obere, aus dem technisch-physikalischen Sachverhalt heraus gegebene Grenzwerte oder
— die Mindestforderungen und Bestwerte, die den praxisrelevanten Wertebereich der Ergebnissumme nach der ungünstigen und nach der günstigen Seite hin begrenzen.

Die Größe der Extremalsummen s^-, s^+ und ihre Zuordnung zu den Grenzpunkten q^-, q^+ ist demnach von der funktionellen Eigenschaft und insbesondere von der Art der BM abhängig.

Liegen als PE Wahrscheinlichkeiten vor (Bild 1, s. Teil 1), kann immer s^-, $s^+ = 0$; 1 oder 1; 0 gesetzt werden (z.B. bei RK-Prüfungen [7] [10]). Sind die PE-Werte physikalische Größen, müssen die Extremal-Ergebnissummen auf der Grundlage theoretisch möglicher oder praktisch zulässiger Minimal-, Maximal- oder Grenzwerte berechnet oder empirisch (ggf. im Ergebnis von Vorprüfungen) festgelegt werden. (Zum Beispiel ist bei Materialwanderungsprüfungen die positive Extremalsumme zweifelsfrei $s^+ = 0$, d.h. keine Materialwanderung; s^- muß experimentell geklärt werden.)

Nr.	a_0	a_1	s^-, s^+	Niveauskale und NKZ	Skale
1	$\geqq 0$	> 0	$\geqq 0$	$q^- = a_0 + a_1 \cdot s^-$ $q^+ = a_0 + a_1 \cdot s^+$ $q = a_0 + a_1 \cdot S$	Proportionalskale
2.1	$-\frac{s^-}{s^+ - s^-}$	$+\frac{1}{s^+ - s^-}$	$\gtreqless 0$	$q^- = 0 \leqq q \leqq q^+ = 1$ $q = \frac{S - s^-}{s^+ - s^-}$	Relativskale
2.2	$+\frac{s^+}{s^+ - s^-}$	$-\frac{1}{s^+ - s^-}$	$\gtreqless 0$	$q^- = 1 \geqq q \geqq q^+ = 0$ $q = \frac{S - s^+}{s^- - s^+}$	

Tafel 2. Berechnung der Niveauskale

Die Maßstabsfaktoren bestimmen den Typ der Niveauskale (Tafel 2):

1. Proportionalskale: a_0 und a_1 sind gesetzt, zwischen NKZ und S besteht der nach Gl. (16) gegebene Zusammenhang. Wenn s^- oder $s^+ \to \infty$, ist die Bewertungsskale einseitig offen. Für die Bewertung von Kontaktmaterialien hat die Proportionalskale untergeordnete Bedeutung. Bei $a_0 = 0$ und $a_1 = 1$ gibt sie als NKZ das arithmetische oder gewichtete Mittel der PE aus (z.B. bei Durchriebprüfungen an Schichtverbunden, wenn die NKZ aus Lebensdauerquantilen resultieren).

2. Relativskale: a_0 und a_1 werden aus den Extremal-Ergebnissummen berechnet, die NKZ liegen in den Intervallen $\langle 0, 1 \rangle$ oder $\langle 1, 0 \rangle$. Damit ist das vom Erzeugnis erreichte und mit der NKZ quantifizierte relative Niveau der funktionellen Eigenschaft auf einer einheitlichen Bewertungsskale eindeutig festgelegt. Die Relativskale wird daher bevorzugt angewendet, sie wird auch bei der IfL-Methode „Erfüllungsgrad" empfohlen [13]. In [21] wurde eine gespreizte Relativskale der Form $q^- = 10$; $q^+ = 0$ zugrunde gelegt. Es ist zweckmäßig, durch „richtiges" Zuordnen von s^-, s^+ bzw. q^-, q^+ zu 0 und 1 die gleiche Korrelation zwischen NKZ und funktioneller Eigenschaft herzustellen wie sie zwischen PE und funktioneller Eigenschaft besteht. Dadurch werden Verbesserung/Verschlechterung der Erzeugniseigenschaft von PE und NKZ gleichsinnig durch steigende/fallende bzw. fallende/steigende Werte angezeigt (vgl. [11] und Tafel 2, Nr. 2.1./2.2.).
Nachdem alle Hilfsgrößen s^-, s^+, a_0, a_1 sowie die Skale $\langle q^-, q^+ \rangle$ bestimmt sind, können die NKZ nach Gl. (16) und den in Tafel 2 gegebenen Formeln bestimmt werden.

4. Anwendungshinweise

Trotz der Qualimetrierung durch NKZ bleibt die QEB aus folgendem Grund immer eine Relativbewertung:
Die Abbildungen von den Mengen E und X in die Menge Q liefern zu jedem Erzeugnis $e^{(k)}$ und zu jeder Ergebnismenge $X^{(k)}$ (Urbilder) genau eine NKZ $q^{(k)}$ (Bild). Da aber für verschiedene Erzeugnisse gleiche NKZ nicht ausgeschlossen sind (wenn identische Ergebnismengen erhalten wurden), sind diese Abbildungen vom Grundsatz her nicht umkehrbar eindeutig. Ebenso ist jede ebenfalls mögliche Abbildung der originalen PE in Q nicht eineindeutig: alle Urbilder $x_{ij}^{(k)}$ haben nur das eine Bild $q^{(k)}$. Eine Absolutbewertung würde die Umkehrbarkeit der x_{ij}-q-Beziehung verlangen und als Voraussetzung dafür die Eineindeutigkeit zwischen $X^{(k)}$ und Q. Da sie bei keinem QEB-Verfahren vorhanden ist [11] [12] [20], sind auch bei der vorgestellten Methodik die NKZ nicht dekodierbar: PE können aus S oder NKZ „rückwärts" nicht ermittelt werden.
Diese Tatsache ist nicht als Nachteil der QEB zu werten, deren Aufgabe primär in der integralen Interpretation der PE besteht und weniger in der Analyse kontakttechnischer Zusammenhänge. Unter diesem Gesichtspunkt werden für Erzeugnisentwicklung, Prüffeld und Applikation gleichermaßen relevante Bewertungsaussagen unter folgenden Voraussetzungen erhalten:

— Das Kontaktverhalten ist immer das Ergebnis der Wechselwirkung mehrerer Einflußkomponenten (typisches Beispiel ist die Korrosionsbeständigkeit). Eine funktionelle Eigenschaft wird um so sicherer charakterisiert, je breiter die Palette der BN und je größer die Anzahl der BM sind. Dadurch kommt das synergistische und das antagonistische Wechselspiel der Einflußkomponenten summarisch und gewichtet in der NKZ zur Geltung. (Das zeigt sich z.B. auch daran, daß der Einfluß statistisch bedingter Schwankungen der PE, die bei anderen Bewertungsverfahren zu Interpretationsschwierigkeiten führen können, durch die NKZ-Berechnung nivelliert wird.) Allerdings sind die BN so zusammenzustellen, daß die NKZ kein unrealistisches Verhalten der Erzeugnisse vortäuschen.

— Es sollten möglichst viele Standards in die AMP/QEB einbezogen werden. Als Vergleichsmaterialien für Edelmetallkontaktwerkstoffe/-halbzeuge/-schaltstücke haben sich die Legierungen AgCu10, E-Ag99,9, AgPd30, AuAg17Ni und AuNi5 TGL 12736 bewährt [22] [23]. Sie liegen im Korrosions- und Verschleißverhalten genügend „weit" auseinander, um auf der Niveauskale verläßliche Fixpunkte zu markieren. Bei Schichtverbunden sind fehlerfreie galvanische NiPd- und NiPdAu-Schichten und ebenfalls Kontaktwerkstoffe nach TGL 12736 als Standards geeignet.

— Jede Bewertung ist so genau und zuverlässig wie ihr informatorischer Input [13]. Über Meßfehler, Stichprobenumfang, Konfidenzniveau, statistischen Status der PE usw. muß deshalb schon vor der AMP völlige Klarheit bestehen. Fehlende oder unsichere PE lassen sich auch durch komplizierte mathematische Operationen nicht ersetzen [13].

— Besonderes Augenmerk erfordert die Konstruktion der Niveauskale. Es muß stets

$$S \in \langle s^-, s^+ \rangle \text{ und } q \in \langle q^-, q^+ \rangle \tag{17}$$

sein. Wird die Niveauskale nach unten oder oben überschritten, sind die Extremal-Ergebnissummen zu „knapp" bemessen. s^- und/oder s^+ müssen neu festgelegt und die NKZ aller zu vergleichenden Erzeugnisse korrigiert werden. Das kann bei umfangreichen AMP zu erheblichem Mehraufwand führen. Deshalb sollten die Extremalsummen einen hinreichend großen Sicherheitsabstand zum wahrscheinlichen Wertebereich der Ergebnissummen haben. (Sind die PE Wahrscheinlichkeiten, s^-, $s^+ = 0{,}1$ oder 1,0 und Gl. (7) eingehalten, wird Gl. (17) immer erfüllt, wenn q^-, $q^+ = 0$, 1 oder 1, 0 ist.)
Zahlenmäßiges Ergebnis der QEB sind

— die NKZ.

Als Zusatzinformationen sind zu nennen (vgl. [21])

— alle BN und BM (das Bewertungsfeld)

— die Niveauskale $\langle q^-, q^+ \rangle$

— die Definition des Schlechtest- und des Bestverhaltens durch PE oder Ergebnissummen, vgl. [21].

Die Angabe des Wichtungsmodus und der Wichtungskoeffizienten kann zweckmäßig sein.
Bild 3 zeigt zusammenfassend den Arbeitsablauf der QEB. Für die rechnergestützte QEB steht im BHKF das BASIC-Programm „QEB" zur Verfügung.

5. Zusammenfassung

Ausgehend von der mengentheoretischen Analyse gebräuchlicher Bewertungsverfahren der funktionellen Eigenschaften von Kontaktwerkstoffen, Schichtverbunden, Kontakthalbzeugen und Schaltstücken für die Schwachstromtechnik wird ein Algorithmus zur qualimetrischen Eigenschaftsbewertung vorgestellt. Das Grundprinzip besteht darin, aus den nach Belastungsniveaus/Prüfbedingungen und Bewertungsmerkmalen gewichteten Prüfergebnissen applikationsorientierter Materialprüfungen eine Kennzahl zu berechnen, die das vom Erzeugnis erreichte relative Niveau der betrachteten Eigenschaft auf einer Bewertungsskale festlegt. Die Niveaukennzahlen mitgeprüfter Standards bilden das Vergleichssystem.
Die QEB wurde in der dargestellten Form bisher bei Prüfungen

— zur Korrosionsbeständigkeit von AuPdAg-Legierungen [24]

— der Korrosions- und mechanischen Verschleißeigenschaften von galvanischen Schichtsystemen für Steckverbinderbauelemente [1] [25] sowie bei

— radiometrischen Erosionsprüfungen an Ag-, AgCu- und AgPd-Schaltstücken

eingesetzt. Über die Ergebnisse wird in späteren Arbeiten berichtet. Die QEB dürfte darüber hinaus auch zur Bewertung von Kontaktwerkstoffen und -bauelementen der Elektroenergietechnik geeignet sein.

Literatur

[20] *Altmann, S.:* Möglichkeiten einer verbesserten Sicherheitsbeurteilung elektrotechnischer Anlagen unter Anwendung der qualimetrischen Schutzgütebewertung. ELEKTRIE, Berlin 33 (1979) 6, S. 303–308
Artikelserie „Qualimetrische Sicherheitsbewertung" in ELEKTRIE, Berlin 36 (1982) 6, S. 283

[21] *Bär, G.*, u.a.: Das Korrosionsverhalten von Kontaktwerkstoffen der Schwachstromtechnik. Stahlberatung, Freiberg 13 (1986) 1, S. 9–14

[22] TGL 12736: Halbzeug aus Edelmetallen und Edelmetallegierungen für elektrotechnisches Leit- und Kontaktmaterial. Ausg. Oktober 1983

[23] *Schiefner, M.:* Verzeichnis der Nichteisenmetalle der DDR. Stahlberatung, Freiberg 11 (1984) 2, S. 13–20

[24] *Rühlicke, D.*, u.a.: Kontakteigenschaften von Gold/Palladium/Silberlegierungen. VII. Kontakt-Tagung der DDR 1983 (Tagungsberichte). Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt 1983, S. 62–66

[25] *Hageni, M.*, u.a.: Eigenschaften galvanischer Gold/Palladium/Gold-Schichten für Steckverbinderkontakte. Wie [24], S. 82–86

EA 5732

Zum Polaritätseffekt der Elektroden in kurzen Luft- und Vakuumstrecken mit ungleichförmiger Feldverteilung

J. Dobrogowski; Z. Kolaczkowski; R. Nawrowski; A. Rybski, Poznan (VR Polen)

Verwendete Formelzeichen

A_2, B_2	Faktoren der Legendreschen Funktion
C, D	Integrationskonstante
E	Elektrische Feldstärke
E_a	Mittlere Überschlags-Feldstärke
E_A	Elektrische Feldstärke am Spitzenscheitel
E_B	Elektrische Feldstärke in der Mitte der Plattenelektrode
$E_{A\mu}$	Höchste elektrische Feldstärke am Spitzenscheitel unter Berücksichtigung des Feldverstärkungsfaktors (bedingt durch die Unebenheiten der Elektroden)
$E_{B\mu}$	Maximale elektrische Feldstärke in der Mitte der Plattenelektrode unter Berücksichtigung des Feldverstärkungsfaktors
P_2, Q_2	Legendresche Funktionen der ersten und zweiten Art
U	Spannung
U_l	Überschlagsspannung
V	Elektrisches Potential
a	Abstand des Brennpunktes des Drehhyperboloiden von der Plattenelektrode
$k_\eta, k_\Theta, k_\varphi$	Einheitsvektoren des angenommenen Koordinatensystems
x, y, z	Kartesische Koordinaten
α	Scheitelwinkel der Hyperboloidspitze
β	Inhomogenitätsgrad des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden längs der Symmetrieachse des Systems
β_A	Inhomogenitätsgrad des elektrischen Feldes am Scheitel der Spitzenelektrode
β_B	Inhomogenitätsgrad des elektrischen Feldes in der Mitte der Plattenelektrode
β_{rA}	Relative Überschlagsfeldstärke am Scheitel der Spitzenelektrode
β_{rB}	Relative Überschlagsfeldstärke in der Mitte der Plattenelektrode
d	Abstand zwischen der Ebene $\left(\Theta = \frac{\pi}{2}\right)$ und der Hyperboloid-Spitze ($\Theta = \Theta_1$) entsprechend Bild 1
β_x	Inhomogenitätsgrad des elektrischen Feldes an der Oberfläche der Hyperboloid-Elektrode
η, Θ, φ	Elliptische Koordinaten
μ_A	Feldverstärkungsfaktor an den Unebenheiten der Spitzenelektrode im Zentrum der Spitze
β_B	Feldverstärkungsfaktor an den Unebenheiten der Plattenelektrode im Elektrodenzentrum

Eine konstante Überschlagsspannung im Vakuum zwischen den Elektroden bei ungleichartigem elektrischem Feld ist bedingt durch folgende gleichzeitig vorkommende Faktoren:

— Polarität der Elektroden
— Verteilung des elektrischen Feldes auf der Elektrodenoberfläche und im Raum zwischen den Elektroden
— aktive Elektrodenoberfläche.

Im Fall einer Luftstrecke hängt die Überschlagsspannung für die betrachteten Elektrodenabstände nicht von der Elektrodenoberfläche ab.

In der vorliegenden Arbeit wird der Polaritätseffekt der Elektroden im System „Spitze — Platte" sowohl in Luft als auch im Vakuum überprüft. Außerdem wird die Verteilung des elektrischen Feldes und dessen Zusammenhang mit der Überschlagsspannung im gewählten System bestimmt.

Dozent Dr.-Ing. *J. Dobrogowski*, Dr.-Ing. *Z. Kolaczkowski*, Dr.-Ing. *R. Nawrowski* und Dipl.-Ing. *A. Rybski* sind im Bereich Hochspannungstechnik des Instituts für Elektroenergetik der Technischen Hochschule Poznań tätig.

1. Forschungsbereich, Methodik und Meßergebnisse

Die Meßergebnisse sind für in Luft und Vakuum (10^{-3} Pa) angeordnete Elektroden aus Vakuumkupfer ermittelt worden.
Genutzt wurden dabei:

a) plattenförmige Elektroden mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Kantenrundung entsprechend der Rogowski-Kurve
b) Hyperboloid-Spitzenelektroden mit Scheitelwinkeln von 30°, 60°, 90° und 120°.

Die Messung der Überschlagsspannung wurde für Elektrodenabstände von 0,5 bis 3,0 mm durchgeführt. Vor Versuchsbeginn sind die Elektroden mechanisch poliert und entfettet worden. Den Vakuumuntersuchungen ging die Konditionierung des Systems mit Vorüberschlagstrom voraus. Für Fälle, bei denen Überschlagsspannungs- und Vorüberschlagsstromwerte feststellbar waren, wurde das System als ein stabilisiertes angenommen [3]. Die Meßergebnisse, bezogen auf die Überschlagsspannung in Luft, stellt Bild 1 dar. Bild 2 zeigt die Abhängigkeit der Überschlagsspannung vom Elektrodenabstand im Vakuum. Für jede Kurve wurde die Messung mindestens fünfmal wiederholt. In den Bildern 1 und 2 sind ausschließlich Mittelwerte dargestellt. Während der Untersuchungen wurde die Zerstörung der Elektrodenoberflächen, die Anschmelzung der Spitzenscheitel sowie die Ablagerung an den Elektroden untersucht. Um den Einfluß dieser Faktoren zu beschränken, erfolgte die Ermittlung der einzelnen Charakteristiken $U_b(d)$, wechselweise bezogen auf die Polarität in mindestens fünf Zyklen. Jedem Meßzyklus ging das Putzen, Polieren und Konditionieren der Elektroden voraus. Für jeden Punkt der Charakteristiken sind wenigstens 30 Messungen durchgeführt worden. Die auf Grund der Meßergebnisse bestimmte Standardabweichung vom Mittelwert beträgt 4% für Luft und 8% für Vakuum.

2. Verteilung des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden

Die Verteilung des elektrischen Feldes kann man durch Approximation der Elektrodenspitze mit einem Drehhyperboloid und durch die Darstellung des analysierten Systems in elliptischen Koordinaten bestimmen [4]. Einen Zusammenhang zwischen den kartesischen Koordinaten (x, y, z) und den elliptischen Koordinaten (η, Θ, φ) sowie den Wertebereich der elliptischen Koordinaten stellen die Gln. (1) und (2) sowie Bild 3 dar:

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \sinh\eta \cdot \sin\Theta \cdot \cos\psi \\ y &= a \cdot \sinh\eta \cdot \sin\Theta \cdot \sin\psi \\ z &= a \cdot \cosh\eta \cdot \cos\Theta \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &0 \leqq \eta < \infty, \\ &0 \leqq \Theta \leqq \pi, \\ &0 \leqq \psi \leqq 2\pi. \end{aligned} \tag{2}$$

Die Laplacesche Gleichung bekommt damit die Form:

$$\Delta V = \frac{1}{a^2 \sinh^2\eta + \sin^2\Theta}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} + \coth\eta \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 V}{\partial \Theta^2} + \cot\Theta \frac{\partial V}{\partial \Theta}\right) + \frac{1}{a^2 \sinh^2\eta \sin^2\Theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \psi^2} = 0. \tag{3}$$

Die Feldstärke wird durch

$$\vec{E} = \operatorname{grad} V = \frac{1}{a\sqrt{\sinh^2\eta + \sin^2\Theta}}\left(k_\eta \frac{\partial V}{\partial \eta} + k_\Theta \frac{\partial V}{\partial \eta}\right) + \frac{k_\psi}{a \sinh\eta \sin\Theta} \frac{\partial V}{\partial \psi}. \tag{4}$$

bestimmt. Bekannt ist die allgemeine Lösung der Gl. (3) nach [4] [5] als:

$$V = [A_2 P_2(\cos\Theta) + B_2 \Theta_2(\cos\Theta)] \cdot P_2 \cdot \cosh\eta + C \ln\tan\frac{\Theta}{2} + D. \tag{5}$$

Die Größen A_2, B_2, C und D können aus (5) bestimmt werden, wo folgende Randbedingungen gelten:

$$\Theta = \Theta_1;\ V = 0,$$

$$\Theta = \frac{\pi}{2};\ V = 0,$$

$$A_2 = 0;\ B_2 = 0;\ C = -\frac{U}{\ln\tan\frac{\Theta_1}{2}};\ D = 0.$$

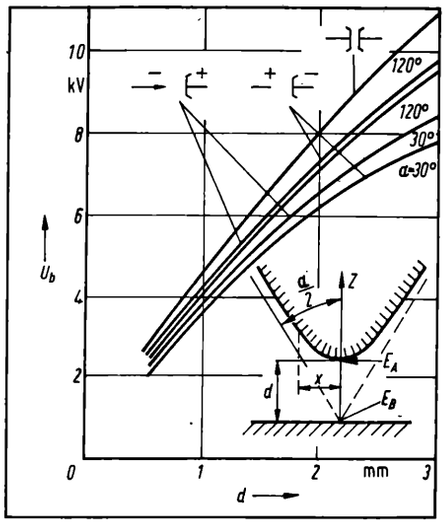


Bild 1. Abhängigkeit der Überschlagsspannung U_b vom Elektrodenabstand b im System „Spitze – Platte" in Luft (Form der Elektroden)

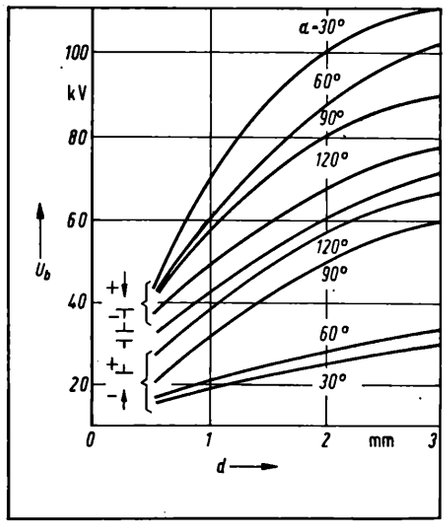


Bild 2. Abhängigkeit der Überschlagsspannung U_b vom Elektrodenabstand d für das System „Spitze – Platte" im Vakuum (10^{-3} Pa) [3]

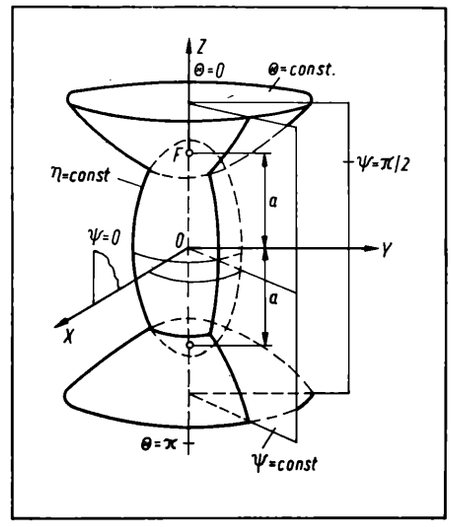


Bild 3. Darstellung zur Berechnung der Verteilung des elektrischen Feldes

Die Potentialänderung läßt sich mit der folgenden Gleichung beschreiben:

$$V = U \cdot \frac{\ln \tan \frac{\Theta_1}{2}}{\ln \tan \frac{\Theta_1}{2}}. \tag{6}$$

Mit (4) und (6) kann der Betrag der Feldstärke in einem beliebigen Punkt zwischen der plattenförmigen Elektrode und der Hyperboloid-Spitze bestimmt werden:

$$|E| = \frac{U \cdot \cos \Theta_1}{d \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \Theta} \cdot \sin \Theta \cdot \ln \cot \frac{\Theta_1}{2}}. \tag{7}$$

Der Inhomogenitätsgrad des Feldes wird definiert als

$$\frac{|E|}{\frac{U}{d}}, \tag{8}$$

vereinfacht darstellbar als:

$$\beta = \frac{\cos \Theta_1}{\sin^2 \Theta \cdot \ln \cot \frac{\Theta_1}{2}} \tag{9}$$

bei $\frac{z}{d} = \frac{\cos \Theta}{\cos \Theta_1}$.

Das gilt unter der Voraussetzung, daß die Betrachtungen auf die zwei Elektroden verbindende Achse beschränkt wird.

Die Abhängigkeit $\beta = f\left(\frac{z}{d}\right)$ für die Scheitelwinkel der Spitze von 30°, 60°, 90° und 120° zeigt Bild 4.

Der Inhomogenitätsgrad des Feldes auf der Hyperboloid-Elektrodenoberfläche kann bei beliebigem Abstand von der Symmetrieachse ($\Theta = \Theta_1$ und $\eta \neq 0$) folgendermaßen beschrieben werden:

$$\beta_x = \frac{\cos \Theta_1}{\sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \Theta_1} \sin \Theta_1 \ln \cot \frac{\Theta_1}{2}} \tag{10}$$

und $x/d = \sinh \eta \tan \Theta_1$.

Die Gl. (10) ist im Bild 5 dargestellt, wobei die Abhängigkeit $\beta_x = (x/d)$ für die Scheitelwinkel $\alpha = 2\ \Theta_1$; $\alpha = 30°$; $\alpha = 60°$ und $\alpha = 120°$ zugrunde gelegt wurde.

Aus der Analyse der beiden Bilder geht hervor, daß den Erwartungen entsprechend die größte elektrische Feldstärke im System „Spitze — Platte" am Scheitel der Spitzenelektrode auftritt. Für die Elektrode mit dem kleinsten Scheitelwinkel ($\alpha = 30°$) beträgt der maximale Inhomogenitätsgrad des Feldes $\beta = 7$. Er wird kleiner, wenn sich der Betrachtungspunkt vom Elektrodenscheitel sowohl längs auf der Oberfläche als auch von der Gegenelektrode entfernt. Für den Spitzenscheitelwinkel $\alpha = 90°$ nähert sich die Verteil-

Bild 4. Werteverteilung des Inhomogenitätsgrades im System „Spitze – Platte" längs der Symmetrieachse

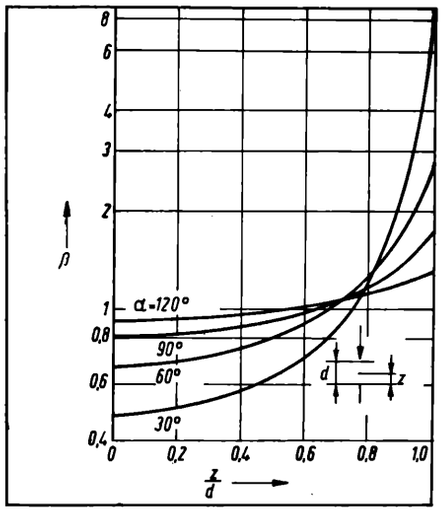


Bild 5. Werte des Inhomogenitätsgrades des Feldes an der Oberfläche einer Hyperboloid-Elektrode als Funktion des Verhältnisses der Entfernung von der Symmetrieachse zum Elektrodenabstand

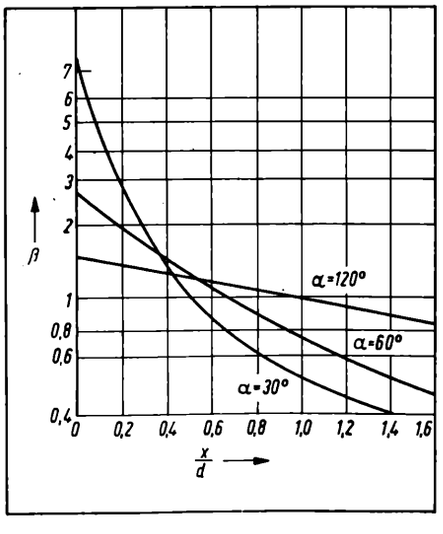
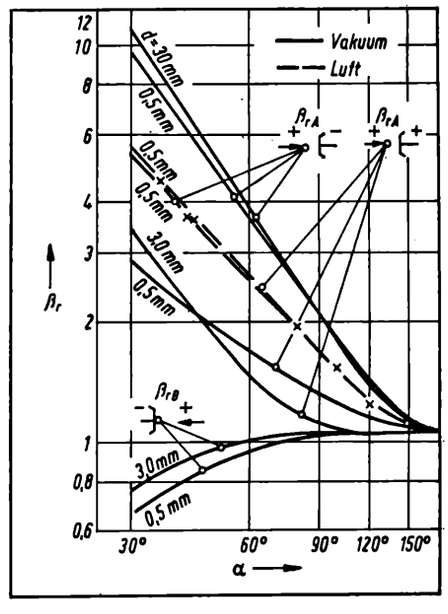


Bild 6. Relative elektrische Überschlagsfeldstärke β_{rA} und β_{rB} im System „Spitze – Platte" als Funktion des Spitzenscheitelwinkels



lung des elektrischen Feldes längs der Symmetrieachse zwischen den Elektroden der homogenen Verteilung an.
Bedeutsam ist, daß der Inhomogenitätsgrad bei plattenförmigen Elektroden Werte < 1 annehmen kann. Das trifft besonders bei kleinem Winkel α zu. Am Scheitel der Spitzenelektrode steigt der Inhomogenitätsgrad bei $\alpha = 20°$ stark an.

α	°	30	20	10	5	2	1
β	—	7	13	42	137	692	2416

Es ist zu betonen, daß die Höchstwerte der elektrischen Feldstärke für die Spitze mit unbegrenzter Höhe gelten. Daraus ist zu schlußfolgern, daß derartige Werte nur für die Makrometrie der Elektroden maßgebend sind. Das gilt unter der Voraussetzung, daß annähernd gleiche Werte für Elektrodenabstand und Spitzenlänge vorliegen. Eine Analyse der Feldverteilung längs der Spitzenoberfläche machte deutlich, daß sich für die Scheitelwinkel $\alpha = 30$ bis 120° das Bild des elektrischen Feldes dem des inhomogenen Feldes, bezogen auf Punkte, die um etwa (0,4 bis 0,6) d von der Symmetrieachse entfernt liegen, annähert.
Die größten Änderungen des Feldes wurden in der Nähe der Symmetrieachse des Systems beobachtet.

3. Überschlagsfeldstärke

Nutzt man die gemessenen Überschlagsspannungen (Bilder 1 und 2), so kann die mittlere Überschlagsfeldstärke $E_a = U_b/d$ bestimmt werden. Ist außerdem der Wert des Inhomogenitätsgrades β des elektrischen Feldes bekannt (Bild 4), so kann der Gradient der Feldstärke im Elektrodenzwischenraum festgelegt werden:

$$E = E_a \beta.$$

Die Anfangsentladungsentwicklung in der Luftstrecke ist von der Höchstfeldstärke, die am Scheitel der Spitze (Punkt A, Bild 1) auftritt ($E_A = E_a \cdot \beta_A$), abhängig. Über den Überschlag entscheiden bei Vakuumstrecken die Feldstärken E_A und E_B:

$$E_{A\mu} = E_a \cdot \beta_A \cdot \mu_A,$$

$$E_{B\mu} = E_a \cdot \beta_B \cdot \mu_B.$$

Die Faktoren μ_A und μ_B sind Feldverstärkungsfaktoren und kennzeichnen den Inhomogenitätsgrad des elektrischen Feldes, bedingt durch Mikrounebenheiten der Elektroden. Sie ändern sich in Abhängigkeit vom Mikroprofil der Elektrodenoberflächen, wobei sie im allgemeinen Werte von einigen bis zu einigen Hundert annehmen. In Luftstrecken beginnt die Entladungsentwicklung in dem die Elektroden umgebenden Gas und wird dort auch fortgesetzt. Demgegenüber ist die Entladungsentwicklung in Vakuumstrecken von Erscheinungen an den Elektroden abhängig. Das ist als Ursache für die Beeinflussung der Überschlagsfeldstärke durch die Feldverstärkungsfaktoren μ zu werten.
Im Bild 6 wurden relative Überschlagsfeldstärken für die Punkte A und B (entsprechend Bild 1) β_{rA} und β_{rB} dargestellt.
Sie kennzeichnen das Verhältnis E_A (Luft) zu $E_{A\mu}$ (Vakuum). Des weiteren ist das Verhältnis E_B bzw. $E_{B\mu}$, das das Spitzenelektroden-System bei vorgegebenem Scheitelwinkel kennzeichnet, gegenüber der Überschlagsfeldstärke der Plattenanordnung abgebildet. Bei Luftstrecken nähern sich alle Verläufe bei minimaler Abweichung der Kurve an, die für einen Elektrodenabstand von $d = 5$ mm gilt. Der Koeffizient β_r überschreitet den Wert 6 nicht. Bei Vakuum hängt der Verlauf von β_r beider betrachteter Punkte A und B sehr stark von der Polarität der Spitze ab.
Für den Winkel $\alpha = 30°$ bei negativer Spitze ist β_r am Spitzenscheitel nicht größer als 4 und erreicht bei positiver Spitze den Wert 12.
Im Mittelpunkt der negativen plattenförmigen Elektrode steigt β_r von 0,7 ($\alpha = 30°$) bis 1 (Spitzenscheitelwinkel etwa 90°). Für die positive plattenförmige Elektrode sind die relativen Überschlagsfeldstärken bei geringem α eine Größenordnung kleiner als die für die negative Plattenelektrode (die Verläufe werden in den Bildern nicht gezeigt!).
Aus den Diagrammen ist ersichtlich, daß das Verhältnis der Feldverstärkungsfaktoren μ_A und μ_B im betrachteten Fall nicht größer als 2 ist. Denn

$$\beta_{rA} = |E_a \beta_A \mu_A| / |E_a \mu_B| \quad \text{bei } \beta_A = 7$$

ist kleiner als 12 (positive Spitze mit $\alpha = 30°$) und gleichzeitig nicht größer als 4 (negative Spitze mit $\alpha = 30°$).
Bei positiver Spitze (kleiner Scheitelwinkel; z. B. $\alpha = 30°$) beträgt das Verhältnis der relativen Überschlagsfeldstärke am Spitzenscheitel gegenüber der relativen Überschlagsfeldstärke im Zentrum der Plattenelektrode etwa 20. Hingegen wird im Fall der negativen Spitze die Größenordnung 10^2 erreicht.
Das Verhältnis verkleinert sich unter der Zunahme des Scheitelwinkels α. Dabei ist es bei positiver Spitzenelektrode mit $\alpha = 90°$ rund 2.
Als Ursache für die verhältnismäßig geringe elektrische Feldstärke an der Plattenelektrode tritt neben dem Einfluß der Raumladung die hohe Festigkeit des Systems (Spitze — Platte) bei kleinem Spitzen-Scheitelwinkel in Erscheinung. Das beweist des weiteren, daß der Anteil des Kathodenmechanismus für die Überschlagserscheinung im Vakuum dominierend in der untersuchten Anordnung ist.

4. Schlußfolgerungen

a) Die elektrische Festigkeit des Systems „Spitze — Platte" ist in Luft für geringe Elektrodenabstände ($d = 0{,}5$ bis 3,0 mm) immer niedriger als die Festigkeit der Plattenanordnung. Sie bleibt um so niedriger, je kleiner der Spitzenscheitelwinkel (bei $\alpha = 30$ bis 120°) ist. Das System „Spitze — Platte" in Luft hat bei negativer Spitze eine um einige % höhere Überschlagsspannung als bei positiver Spitze.
b) Die elektrische Festigkeit der Anordnung „Spitze — Platte" ist gegenüber der Plattenanordnung im Vakuum von der Elektrodenpolarität abhängig. Eine höhere Festigkeit als die der Plattenanordnung hat die Anordnung „Spitze — Platte" mit positiver Spitzenelektrode. Die Festigkeit wächst im Bereich der angenommenen Parameter d; α mit der Verringerung des Scheitelwinkels. Für die negative Spitze ist die Festigkeit der Anordnung niedriger als die der Plattenanordnung. Sie verkleinert sich bei Winkelverminderung. In der untersuchten Anordnung hat man bei der positiven Spitze eine fast um den Faktor 4 größere Überschlagsspannung im Vergleich zur negativen Spitze erhalten.
c) Die höchste elektrische Feldstärke kommt in dem System „Hyperboloidspitze — Platte" an der Spitze in der Symmetrieachse der Elektrode vor. Der Inhomogenitätsgrad des Feldes ist für größere Spitzenscheitelwinkel ($\alpha > 30°$) nicht größer als 7. Der große Anstieg des Wertes tritt erst für $\alpha < 20°$ auf.
d) Die Verteilung des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden längs der Symmetrieachse ist im System „Spitze — Platte" der inhomogenen Verteilung bei Spitzenscheitelwinkel $\alpha > 90°$ angenähert.
Der Bereich der Feldverstärkung ist bei der Spitzenelektrode nur gering (Bild 4). Für $\alpha = 30°$ ist das Verhältnis $\frac{z}{d} \geqq 0{,}76$ bestimmend, und für $\alpha \leqq 120°$ gilt das Verhältnis $\frac{z}{d} \geqq 0{,}70$. Im Bereich $\alpha = 30$ bis 120° nähert sich das elektrische Feldbild auf der Spitzenoberfläche dem inhomogenen Feldbild für die um etwa $0{,}5\,d$ von der Symmetrieachse der Anordnung entfernten Punkte an. Der Inhomogenitätsgrad des Feldes an der Plattenelektrode kann Werte < 1 annehmen, insbesondere für kleine Winkel α.
e) Die vom Mikroprofil der Elektroden abhängigen mittleren Feldverstärkungsfaktoren μ_A und μ_B an den Elektroden der untersuchten Anordnung „Spitze — Platte" im Vakuum unterscheiden sich in ihrem Verhältnis nicht um den Faktor 2 (angenommen: keine Einwirkung der Raumladung).
f) Das Verhältnis der relativen Überschlagsfeldstärke am Spitzenscheitel (β_{rA}) gegenüber der relativen Überschlagsfeldstärke im Zentrum der Plattenelektrode (β_{rB}) betrug in der untersuchten Anordnung für den kleinsten Scheitelwinkel $\alpha = 30°$ etwa 20 (positive Spitze) bzw. 100 (bei negativer Spitze). Das Verhältnis verkleinert sich mit der Zunahme des Scheitelwinkels. Für $\alpha \geqq 90°$ beträgt es fast 1.
g) Die verhältnismäßig geringe elektrische Feldstärke an der Plattenkathode ist neben dem Einfluß der Raumladung als Ursache für die hohe Festigkeit des Systems „Spitze — Platte" (mit positiver Spitze) zu werten.

5. Zusammenfassung

Es wurden die Meßergebnisse der konstanten Überschlagsspannungen U_b für Vakuum (10^{-3} Pa) und Luftstrecken bei Abständen $d = 0{,}5$ bis 3 mm zwischen der plattenförmigen Elektrode ($D =$ 20 mm) und der Hyperboloid-Elektrode mit Scheitelwinkeln im Bereich von 30 bis 120° dargelegt. Die Verteilung des elektrischen Feldes sowie des Inhomogenitätsgrades und der Feldverstärkungsfaktoren in den behandelten Anordnungen wurden untersucht. Die Ergebnisse der Analyse der Überschlagspannungswerte und der elektrischen Feldstärke liegen vor. EA 5700

Dualitätsgerechte Begriffe für die Leistungselektronik

E. Blumschein, KDT, Magdeburg

Neben den zuerst erfundenen (primalen) Schaltungen nutzt die Leistungselektronik zunehmend auch deren widerstandsreziprok inverse (duale) Entsprechungen. Es wird geprüft, inwieweit zur Beschreibung der dualen Schaltungen bisher gültige Grundbegriffe geeignet sind, die man in Unkenntnis der generellen Dualität aller Strukturen, Vorgänge, Eigenschaften usw. für die primalen Schaltungen geprägt hatte. Eine Analyse des Begriffs Kommutierung dient als Beispiel dafür, daß Entscheidungen für dualitätsgerechte Begriffe nötig und möglich sind.

1. Dualitätsprüfung

Die vollständige Dualität der Darstellung beliebiger leistungselektronischer Sachverhalte ist eine leicht überprüfbare [1] notwendige Voraussetzung für ihre Richtigkeit und Vollständigkeit. Dualitätskontrollen lassen auch unlogische Benennungen sowie Differenzen zwischen Wortbedeutung und Begriffsinhalt erkennen. Beispielsweise hilft die Gegenüberstellung im Bild 1, die Annahme zu prüfen, nur T1, nicht jedoch DO sei an der Übertragung des wesentlichen Teils der Energie beteiligt. In der dualen Schaltung leitet während der Energieübertragung DO, und T1 trägt die Spannung. Die Annahme ist also falsch, nicht geeignet eine Unterscheidung von Haupt- und Nebenzweig zu begründen.

Auch die Darstellung der Dualität von B6-Schaltungen [2] kann nicht korrekt sein, weil diese Struktur weder zu sich selbst noch zu einer anderen dual ist.

Dualität sollte sich in der Regel in dualen Begriffen widerspiegeln. Das Gegenstück zur gleichspannungsseitigen Kommutierung [3] wäre nicht die wechselspannungsseitige, sondern die gleichstromseitige. Da die primale Kommutierung jedoch wechselspannungsseitig erfolgt, hat man die duale wechselstromseitig zu suchen.

Umgekehrt ist zu prüfen, ob Paaren dualer Begriffe tatsächlich völlig duale Schaltungseigenschaften entsprechen. Strom- und Spannungs-Schwingkreis-Wechselrichter sind nur bedingt dual zueinander [4].

Wenn Begriffsinhalt und Wortbedeutung nicht übereinstimmen, kann die Umkehrung befremdend bis unsinnig sein (Beispiel: Zwangslöschung — Zwangszündung).

Zu vielen dualen Sachverhalten fehlen entsprechende Begriffe.

2. Herstellen dualitätsgerechter Begriffe

Für primale und duale Schaltungen gleichermaßen gültig sind solche inversionsinvarianten abstrakten Begriffe, wie Führung, Taktung, Erregung und Steuerung. Der objektiv vorhandenen Dualität konkreterer muß man mit je drei Begriffen gerecht werden. Ist ein Oberbegriff vorhanden, läßt sich das Paar dualer Begriffe durch konkretisierende Zusätze bilden (Beispiel: Strom- und Spannungswechselrichter). Existiert ein duales Paar, so ist der Oberbegriff zu ergänzen (Beispiel: Löschen und Zünden = Schalten von Thyristoren).

Behindert wird das Herstellen dualitätsgerechter Begriffe oft durch eine unnötige Enge der Definition traditioneller Begriffe oder auch durch das scheinbar konkretisierende Wort Strom in Oberbegriffen (Beispiele: Wechselstromsteller, Stromrichter). Möglichen Umdeutungen folgt die Praxis erst, wenn sie eine Notwendigkeit zur Unterscheidung erkennt, nicht beispielsweise Drehspannungsteller statt Drehstromsteller mit Oberbegriff Drehgrößensteller.

Vor übereifrigen Korrekturen nach dem Muster Spannungsquelle statt Stromquelle möge die Ablehnung des Begriffs Spannungsrichter warnen. Die Einteilung der leistungselektronischen Schaltungen

Dr.-Ing. *Eckard Blumschein*, Technische Universität „Otto von Guericke" Magdeburg, Sektion Automatisierungs- und Elektrotechnik. Wissenschaftsbereich Elektrotechnologische Verfahren und Anlagen

Bild 1. Beispiel einer Dualitätsprüfung

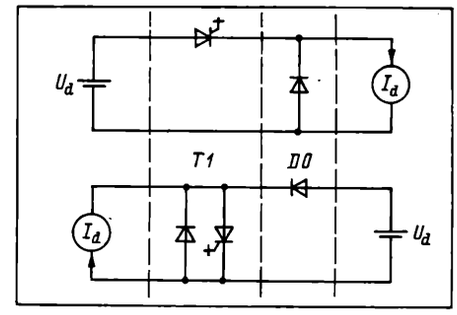
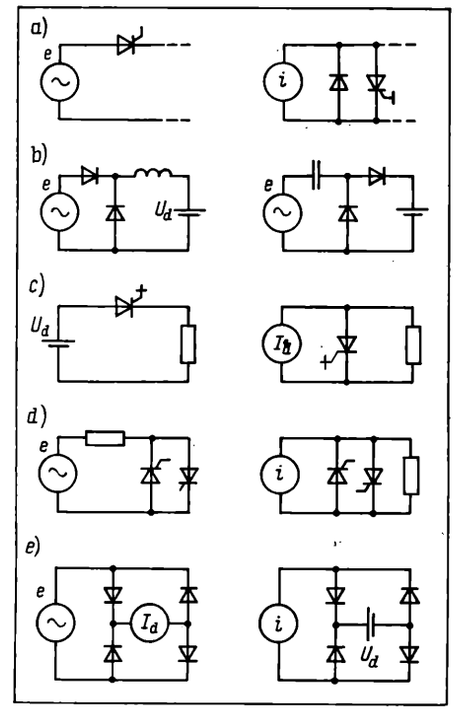


Bild 2. Unterscheidung von Stromventilstruktur (links) und Spannungsventilstruktur (rechts)
a Thyristor und Dualthyristor (nur ausschaltbar)
b Gleichspannungs- und -stromübernahme
c selbstgeführt ohne Kommutierung
d fremdgeführt ohne Kommutierung
e auch bei Strukturidentität



(Stromrichter) in Strom- und Spannungsrichter entspricht zwar der akzeptablen Unterscheidung zwischen Strom- und Spannungsventilen [5], müßte jedoch durch Verzicht auf den Oberbegriff Stromrichter erkauft werden. Man sollte besser einen neuen Begriff konkretisieren. Vorgeschlagen wird „Ventilstruktur".

3. Strom- und Spannungsventilstruktur

Strom- bzw. Spannungsventilstrukturen sind Stromrichter, deren Funktion von Strom- bzw. Spannungsventilen bestimmt wird. Stromventile sind rückwärtssperrend und zumindest einschaltbar (Thyristoren). Spannungsventile sind rückwärtsleitend und als Dualthyristoren nur ausschaltbar. Sind nur ungesteuerte Ventile vorhanden, so gelingt die Unterscheidung nach der Anordnung derjenigen Ventile, die unmittelbar mit den führenden Wechselgrößen zusammen wirken.

Stromventilstrukturen sind dann durch funktionsbestimmende Dioden gekennzeichnet, die in Reihe zu Wechselspannungsquellen angeordnet sind und deren Strom schalten. In Spannungsventilstrukturen befinden sich Dioden parallel zu Wechselstromquellen und schalten deren Spannung (Bild 2).

Die Klassifikation nach der Ventilstruktur ist also bei allen elementaren Stromrichterschaltungen und auch dann möglich, wenn sie keine echt unterscheidbare zweite Seite und folglich keine Strom- oder Spannungsübernahme (Kommutierung) aufweisen [1]. Sie ist ferner unabhängig davon, inwieweit die real angeschlossenen Elemente idealen Strom- oder Spannungsquellen entsprechen.

Man erkennt die Stromwechselrichter und die gewöhnlichen Gleichrichter auch daran als Stromventilstrukturen, daß sie an eingeprägtem Gleichstrom arbeiten. Die Spannungswechselrichter und die Gleichrichter mit eingeprägter Gleichspannung sind Spannungsventilstrukturen.

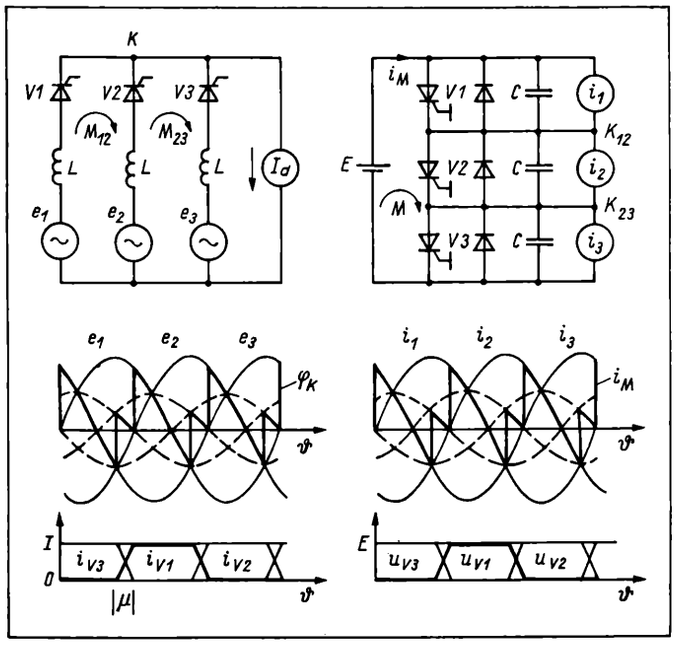


Bild 3. Stromübernahme (Kommutierung) links und Spannungsübernahme rechts

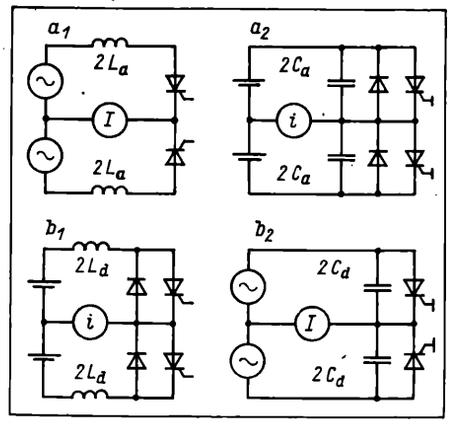


Bild 4. Stromventilstruktur (M2-Schaltung)
a_1 mit Stromübernahme, b_2 mit Wechselspannungsübernahme
und Spannungsventilstruktur (D-Schaltung)
a_2 mit Spannungsübernahme, b_1 mit Wechselstromübernahme

Auf diesen nicht mit Interpretationsschwierigkeiten belasteten Begriffen aufbauend kann im folgenden der Begriff Kommutierung als ein Beispiel dafür diskutiert werden, daß man vor dem Herstellen der Dualitätsgerechtheit alter Begriffe Klarheit über ihren Bedeutungsumfang und ihre Beziehungen zu ergänzenden und benachbarten Begriffen braucht.

4. Strom- und Spannungsübernahme

Allgemeingültig (als Oberbegriff) ließe sich die Kommutierung in der Leistungselektronik als ein Schaltvorgang beschreiben, an dem mindestens zwei Ventile beteiligt sind, die dabei ihre Rolle tauschen (kommutieren). Ein vorher stromführendes Ventil übernimmt eine Spannung und ein vorher spannungstragendes Ventil einen Strom. Gleichgültig, ob die Ventile oder der Gleichstrom, ob sie aktiv oder passiv als Gegenstand der Kommutierung angesehen werden, gilt als Kommutierung üblicherweise nur die Übernahme des Gleichstroms. Der Kommutierungsbegriff ist also in zahlreichen Fachausdrücken unkorrigierbar zweifach konkretisiert verankert (als Übernahme eines Stroms und einer Gleichgröße). Dieser ursprünglichen, nachfolgend kurz als Stromübernahme bezeichneten Kommutierung stellt Bild 3 ihre duale Entsprechung gegenüber. Die Spannungsübernahme kennzeichnet Spannungsventilstrukturen. Maschen sind Knotenpunkte, Strömen sind Spannungen dual und umgekehrt. Die Stromventile übernehmen bei der Stromübernahme innerhalb der Kommutierungsgruppe sowohl den Gleichstrom als auch die führenden Wechselspannungen (Kommutierungsspannungen). Ebenso übernehmen die Ventile der Spannungsventilstruktur bei der Spannungsübernahme innerhalb der entsprechenden Gruppe wechselweise die Gleichspannung und die führenden Wechselströme. Die nicht dualitätsgerechte Bezeichnung der Spannungsübernahme als gleichspannungsseitige Kommutierung kann auch aus folgenden Gründen nicht empfohlen werden: Die Anschauung erkennt eine Übernahme (Kommutierung) zwischen den benachbarten Ventilen, also im betrachteten Strukturpaar (Bild 3) wechselgrößenseitig, in der D-Schaltung (Bild 4) gleichgrößenseitig und in der B2-Schaltung beiderseits.
Im Zweifelsfall, z. B. bei Schaltungen zwischen Gleichgrößenquellen, ist es zweckmäßig, die Frage Strom- oder Spannungsübernahme nach der Ventilstruktur zu entscheiden.

5. Übernahme in fremdgeführten Schaltungen

Reale fremdgeführte Schaltungen enthalten in Reihe zu Ventilen Induktivitäten oder parallel zu ihnen Kapazitäten, die eine allmähliche Strom- oder Spannungsübernahme verbunden mit einem Blindleistungsaustausch erzwingen. Während einer Spannungsübernahme überlappen sich dann die Nichtleitdauern von Ventilen. Es wird erwogen, die Übernahmedauer möglichst auch in diesem Fall als Überlappungsdauer (μ) zu bezeichnen. Die bekannten Merkmale der allmählichen Stromübernahme sind bei der Spannungsübernahme lückenlos dual wiederzuerkennen: kapazitive Blindleistung vom Netz, Übernahmebeginn mit Umschalten eines Ventils in den Nichtleitzustand, Ende mit Umschalten eines anderen in den Leitzustand, allmähliche Ventilspannungsänderung, Ventilstromsprünge, stufiger Gleichstromverlauf. Durch die Gleichspannungsquelle fließt der Mittelwert der Ströme der beteiligten Stromquellen. Er entspricht dem Mittenpotential (Bild 3).
Auch nach außen entspricht das U-I-Verhalten bei Spannungsübernahme völlig dem I-U-Verhalten bei Stromübernahme: Belastungskennlinien gespiegelt, Wechselspannung blockförmig, Einbrüche im Wechselstrom, Asymmetrie der Stelldynamik umgekehrt.

6. Paare von Betriebszuständen

Die Speicherelemente an den Ventilen beeinflussen deren Schaltzeitpunkte. Sie heben die Identität der Übernahme von Gleichstrom und Wechselspannung oder von Gleichspannung und Wechselstrom auf (Bild 4). Als Gleichgröße kann bei Frequenzumrichtern die niederfrequente Größe gelten. Bild 5 zeigt alle sinnvollen Varianten der Anordnung eines funktionsbestimmenden Speicherelements in der B2-Schaltung. Man erkennt 4 einander ähnliche Paare von Betriebszuständen, an denen das Speicherelement beteiligt ist:

a) Die Energieübertragung zwischen den Quellen wird dadurch unterbrochen, daß alle Ventile leiten ($a_{1,3}$) oder sperren ($a_{2,4}$) und das Speicherelement mit der Wechselgrößenquelle Energie austauscht bis zwei Ventile die unabhängige Gleichgröße übernommen haben (Überlappung).

b) Das Speicherelement hat während des Energieaustausches zwischen den Quellen Energie aufgenommen und gibt sie während alle Ventile leiten (b_1) oder sperren (b_2) an die Gleichgrößenquelle ab bis zwei Ventile die unabhängige Wechselgröße übernommen haben (Glättung).

c) Das Speicherelement gehört zur Wechselgrößenquelle und kann deshalb Energie nur austauschen, während nur zwei Ventile leiten ($c_{2,4}$) bzw. sperren ($c_{1,3}$). Wenn die beiden anderen die Spannung bzw. den Strom wieder abgegeben haben, beginnt die abhängige Gleichgröße zu lücken.

d) Im Unterschied zu c gehört das Speicherelement zur Gleichgrößenquelle, und die unabhängige Gleichgröße lückt.

Ein selbstgeführter Betrieb ist nur möglich bei $c_{1,3}$ und d_2 mit Spannungsventilen oder bei $c_{2,4}$ und d_1 mit Stromventilen. Bei Variante b verbieten sich Quellenwechselgrößen mit unstetigem Zeitverlauf, und eine Steuerung wäre nur mit rückwärtsleitenden Thyristoren (b_1) oder rückwärtssperrenden Dualthyristoren (b_2) möglich. Die Schaltungen mit Induktivität sind durch den Freilauf ($a_{1,3}$ oder b_1) oder das Lücken des Gleichstroms ($c_{1,3}$ oder d_1) gekennzeichnet. Bei Gleichrichtern mit zwei Induktivitäten L_a und L_d können beide Erscheinungen einzeln und auch nebeneinander auftreten. Bild 6 zeigt das für Speisung aus Rechteckwechselgrößen. Die Belastungskennlinien haben an der Lückgrenze und an der Freilaufgrenze Knicke.

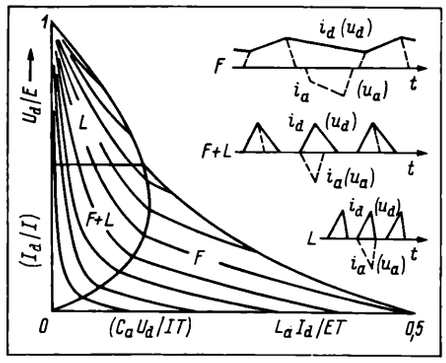


Bild 6. Kennlinienfeld mit Grenzen der Zustände
L Lücken, F Freilauf

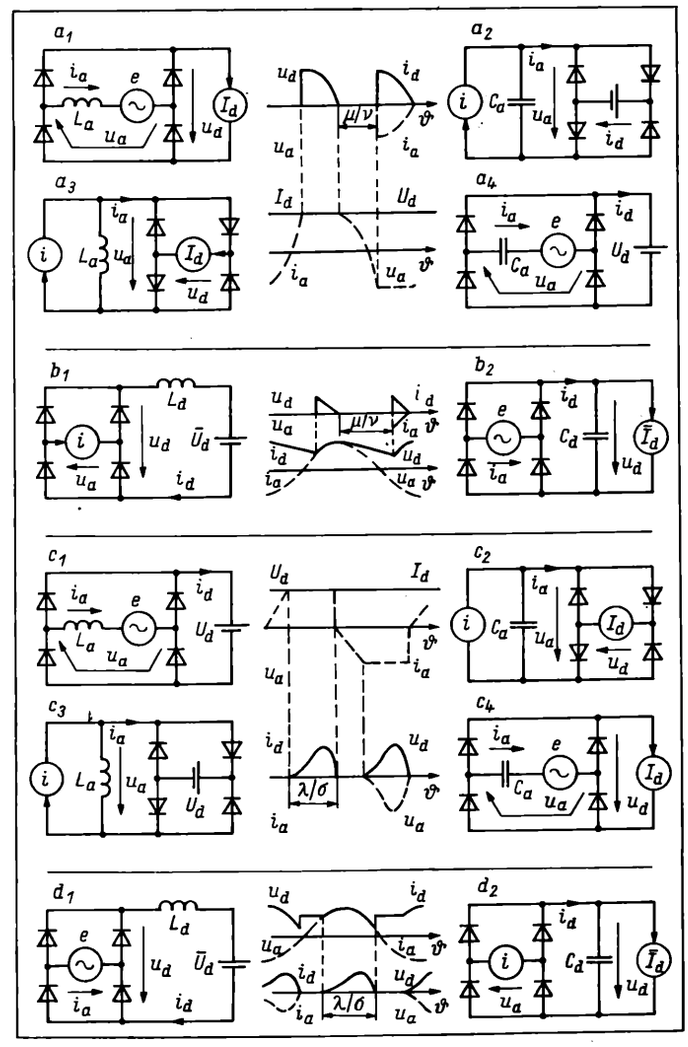


Bild 5. Anordnungsvarianten eines funktionsbestimmenden Speicherelements
I_d eingeprägter Gleichstrom, U_d eingeprägte Gleichspannung, u_d abhängige Gleichspannung, i_d abhängiger Gleichstrom, e eingeprägte Wechselspannung, i eingeprägter Wechselstrom, i_a abhängiger Wechselstrom, u_a abhängige Wechselspannung

Tafel 1. Überdeckung der Begriffe Führung, Kommutierung und Löschung

Aussage	Führung	Kommutierung	Löschung
betrifft Selbständigkeit	fremd- oder selbstgeführt	natürliche oder erzwungene Kommutierung und Löschung	
Ursache	Führung, Kommutierung und Impulse	Löschung durch Quellen (Netz, Last, Schwingkreis) oder	
Ablauf		ein- oder mehrstufige bzw. direkte oder indirekte Kommutierung und Löschung	
		unabhängige oder verzögerte Kommutierung	Einzel-, Gruppen- oder Phasenfolgelöschung
Anordnung		ein- oder mehrfache Kommutierung	Reihen- oder Parallellöschung
gilt für	idealisierte Schaltungen beliebiger Struktur	Stromübernahme in Stromventilstrukturen	Ausschaltvorgang bei Thyristoren

Tafel 2. Klassifikation einer Stromventilstruktur nach ihrer Steuerbarkeit

Steuerbarkeit der Schaltung		frei steuerbar	steuerbar	nicht steuerbar
Freiheitsgrade		2	1	0
Führungsart		selbstgeführt	fremdgeführt	fremdgeführt
Stromventil	Art	GTO	Thyristor	Diode
	Einschaltbarkeit	aktiv	aktiv	passiv
	Ausschaltbarkeit	aktiv	passiv	passiv

7. Klassifikation nach Kommutierungsursache, Löschart, Führung oder Steuerbarkeit?

Als Klassifikationsmerkmal zur Unterscheidung von Schaltungen nach der Selbständigkeit des Schaltens ihrer Ventile sind die Adjektive „kommutiert", „geführt" und „gelöscht" in vielfältigen Zusammensetzungen gebräuchlich (Tafel 1).

Gegen die im Ausland sehr verbreitete Klassifikation nach der Kommutierung hatte *Wolf* [6] eingewandt, daß Betriebszustände ohne Kommutierung existieren und zweitens Schaltungen an einem zur Führung geeigneten Netz auch zwangsgelöscht betrieben werden können. TGL 200-0608 schrieb deshalb die Klassifikation nach der Löschart vor. Sie richtet sich nach der Herkunft der zum Löschen dienenden Spannung. Da der Begriff Löschung nicht inversionsinvariant ist, kann er kein für beliebige Ventile sinnvolles Klassifikationsmerkmal sein. Beispielsweise arbeiten Schwingkreiswechsel-

richter im Dualthyristorbetrieb [4] mit aktiv ausschaltenden Ventilen selbstgelöscht. Ihre Dualität zu den normalen lastgeführten Wechselrichtern beweist jedoch, daß auch sie fremdgeführt sind. Der allgemeingültige Begriff Führung verdient den Vorzug. Er darf selbstverständlich nicht auf die untauglichen Begriffe Kommutierung und Löschung gestützt werden, etwa indem man die Führung nach der Herkunft der Kommutierungsspannung beurteilt [7]. Die Führung darf sich auch nicht nach dem Selbständigkeitsgrad des (Wechselspannungs-) Netzes [6] richten. Selbstgeführt muß bedeuten, daß sowohl das Ein- als auch das Ausschalten von Ventilen aktiv und unabhängig von äußeren Wechselgrößen erfolgen. Sonst ist eine Schaltung fremdgeführt. So gesehen gibt es keine kombiniert geführten [6] elementaren Schaltungen.
Für Schaltungen mit idealen Elementen ist die Unterscheidung selbst- oder fremdgeführt unzweifelhaft. Die Führung realer Schaltungen hängt mitunter davon ab, ob man Löscheinrichtungen als zu Ventilen gehörig oder als außerhalb der Schaltung befindlich auffaßt. Fremdgeführte Schaltungen sind manchmal in der Lage, auch selbstgeführt zu arbeiten. Um Selbstführbarkeit auszudrükken, wird die Benennung „frei steuerbar" empfohlen (Tafel 2). Schaltungen mit Transistoren oder GTO sind also frei steuerbar, wenn keine Induktivitäten oder Kapazitäten vorhanden sind, die eine sprunghafte Strom- bzw. Spannungsübernahme verhindern. Thyristor- und Dualthyristorschaltungen sind nur steuerbar, Diodenschaltungen sind nicht steuerbar.

8. Zusammenfassung der Empfehlungen

Eine formale Prüfung der Dualitäten kann Mängel in Begriffssystemen offenbaren. Um zukünftig Fehler beim Herstellen der Dualitätsgerechtheit vermeiden zu helfen, wurden aktuelle Benennungsprobleme erwähnt. Es wird vorgeschlagen, den Spannungsrichter als Spannungsventilstruktur zu bezeichnen und die Kommutierung als Strom- oder Spannungsübernahme zu verallgemeinern. Argumente gegen die Bezeichnungen wechsel- und gleichspannungsseitige Kommutierung wurden angedeutet. Es wird weiter erwogen, die Begriffe Überlappungsdauer und Lückzustand so zu definieren, daß eine Anwendung auf Spannungsventilstrukturen nicht ausgeschlossen ist.
Die Klassifikation leistungselektronischer Schaltungen sollte nicht mehr nach ihrer Kommutierung oder Löschung, sondern nach ihrer Führung oder ihrer Steuerbarkeit erfolgen.

Literatur

[1] *Blumschein, E.:* Erkenntnisse zur Systematik von Stromrichterschaltungen. Wiss. Z. Techn. Hochsch. Magdeburg 26 (1982) 4, S. 51–55
[2] *Heumann, K.:* Grundlagen der Leistungselektronik. Stuttgart: B. G. Teubner Verlag 1975
[3] *Haeuseler, M.:* Der gleichspannungsseitig kommutierende Stromrichter zur Blindleistungserzeugung und zur elastischen Kopplung von Drehstromnetzen. Dissertation TU Berlin 1968
[4] *Blumschein, E.:* Schwingkreiswechselrichter im Dualthyristorbetrieb. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 7, S. 248–250
[5] *Beck, H. P.; Michel, M.:* Spannungsrichter – ein neuer Umrichtertyp mit natürlicher Gleichspannungskommutierung. etz-Archiv 3 (1981), S. 427–432
[6] *Wolf, H.:* Bemerkungen zu einigen Begriffen der Stromrichtertechnik. Der VEM-Elektroanlagenbau 5 (1969) 3, S. 161–165
[7] *Zach, F.:* Leistungselektronik. Wien: Springer Verlag 1979

EA 5789

Regelung eines Stromrichtermotors an der Wechselrichtertrittgrenze

T. Kaczmarek; J. Deskur, Poznan (VR Polen)

Verwendete Formelzeichen und Indizes

E, e	EMK
I, i	Strom
L	Induktivität
m	Drehmoment
t	Zeit
X	Reaktanz
α	Zündverzögerungswinkel
β	Voreilwinkel
∂	partielles Differential
Δ	Abweichung, Zuwachs
ε	Kommutierungswinkelreserve
μ	Überlappungswinkel
ψ	Flußverkettung
ω	Winkelgeschwindigkeit
d	Gleichstrom
e	elektromagnetisch
k	Kommutierung
m	Maximalwert
N	Nennwert
o	mit der Polradspannung verbunden
s	Schonzeit, Stator
z	soll, Zusatzsignal
ε	mit der Kommutierungsreserve verbunden

Einen elektrischen Antrieb mit einer Synchronmaschine, die über einen maschinengeführten Stromrichter aus einem Gleichstrom-Zwischenkreis gespeist wird, bezeichnet man als Stromrichtermotor (SRM). Aufgrund der aktiven Polraderregung kann die übererregt betriebene Maschine selbst die erforderliche Blindleistung zur Kommutierung liefern. Als maschinenseitiger Stromrichter kann daher eine einfache Thyristor-Drehstrom-Brückenschaltung, wie beim Netzstromrichter, verwendet werden. Man steuert den maschinenseitigen SR entweder mit konstantem Steuerwinkel α_0 gegenüber der Polradspannung e_s (Polradtaktung) oder mit konstantem Steuerwinkel gegenüber der Phasenspannung U_s (Spannungstaktung). Im allgemeinen kann der SRM, ähnlich wie ein Gleichstrommotor, mit drei Größen gesteuert werden:

U_G Spannung des netzseitigen Stromrichters,
U_f Erregerspannung,
β Voreilwinkel des maschinenseitigen Stromrichters.

Die entsprechenden Größen des Gleichstrommotors sind:

Ankerspannung,
Erregerspannung,

Winkel zwischen der Bürstenachse und der neutralen Linie des Motorfeldes.
Die Steuerungsziele des SRM unterscheiden sich von den Steuerungszielen anderer geregelter Antriebe nicht. Es gelten i. allg. zwei Grundziele der Steuerung:

1. Hohe energetische Anzeige, d. h., den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor zu sichern.
2. Gute statische und dynamische Parameter, d. h., die entsprechende Regelgüte des Antriebs zu sichern.

Das erste Ziel kann durch entsprechende Steuerung des Wechselrichters und des Erregers erreicht werden.
Das zweite Ziel fordert ein gutes Zusammenwirken aller Regelschleifen und bildet eine komplexe Regelaufgabe. Eine allgemeine Steuerstruktur des SRM ist im Bild 1 dargestellt.
In diesem Beitrag werden nur die Regelungsprobleme besprochen, die mit der Steuerung des Wechselrichters verbunden sind.

Doz. Dr. sc. *T. Kaczmarek* und Dr.-Ing. *J. Deskur*, Technische Hochschule Poznań (VR Polen)

1. Steuerung des maschinenseitigen Stromrichters (SR)

1.1. Kommutierungsreserve — Grundbegriffe

Eine der wichtigsten Aufgaben der Steuerungseinrichtung eines maschinengeführten SR ist, die natürliche Kommutierung von Thyristoren in allen Betriebszuständen des SRM zu sichern. Wie bekannt, ist es für die optimale Ausnutzung des SRM günstig, wenn der maschinenseitige SR an der Wechselrichtertrittgrenze arbeitet. Der zulässige Minimalwert des Vorteilwinkels ist

$$\beta = \mu + \varepsilon. \tag{1}$$

ε Kommutierungswinkelreserve,
μ Überlappungswinkel.

Der Begriff der Kommutierungsreserve muß an dieser Stelle besprochen werden. In der Literatur bezeichnet man als Kommutierungsreserve den Winkel

$$\varepsilon > \omega\, t_s. \tag{2}$$

Diese Winkelreserve hat nur bei Netzfrequenz eine praktische Bedeutung, sie nimmt dann Werte zwischen 2° und 10° an. Für den SRM hängt ε von der Drehzahl ab und kann nur (bei geringen Geschwindigkeiten) von etwa 0,2 bis zu 1° betragen, d.h., die Winkelreserve muß kleiner als der Steuersatzfehler sein. In theoretischen Arbeiten [1] [2] wird für den SRM eine Winkelreserve von 5° bis 10° vorgeschlagen. In der Praxis ist das aber wegen der Kommutierungsstörungen nicht realisierbar. Den größten Einfluß auf die Kommutierungszeit haben die Stromänderungen, die mit der Belastung und Drehzahlvorgabe verbunden sind. Es ist deswegen zweckmäßig, einen neuen Begriff einzuführen, die Kommutierungsstromreserve I_ε, d.h. einen Zwischenkreisstromanstieg, bei dem die Wechselrichtertrittgrenze erreicht wird, wenn der Voreilwinkel β konstant ist (Bild 2). Einen angenäherten Zusammenhang zwischen der Kommutierungswinkelreserve und der Kommutierungsstromreserve kann man von der vereinfachten Kommutierungstheorie ableiten. Unter der Voraussetzung, daß die Resistanz im Kommutierungskreis gleich Null und die Spannungen und Flüsse hinter der subtransienten Reaktanz sinusförmig sind, erhält man eine einfache Formel, die den Zusammenhang zwischen den Winkeln α und μ und dem Zwischenkreisstrom I_d angibt:

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu) = \frac{2\,X_k\,I_d}{E_m}. \tag{3}$$

Wird E_m in (3) durch die Amplitude der entsprechenden Flußverkettung ψ_m, die Reaktanz X_k durch die Induktivität L_k und der Zündverzögerungswinkel α durch Voreilwinkel β ersetzt, so gilt

$$\cos\varepsilon - \cos\beta = \frac{2\,L_k}{\psi_m} I_d. \tag{4}$$

Ist die Winkelreserve bei vorausgesetzten und konstant gehaltenen Werten I_d und β gleich ε, dann sinkt die Winkelreserve nach einem Stromanstieg um I_ε auf Null ab. Nach Subtraktion des Anfangszustandswertes vom Endzustandwert gemäß (4) erhält man für die Kommutierungsstromreserve

$$I_\varepsilon = \frac{\psi_m\,(1 - \cos\varepsilon)}{2\,L_k}. \tag{5}$$

Die im Zähler stehende Größe ist gleich dem mit dem Kommutierungskreis verketteten Flußanstieg, der nach Blockierung des Thyristors folgt. Deswegen kann man auch von einer Kommutierungsflußreserve sprechen, denn aus (5) folgt

$$\psi_\varepsilon = \psi_m\,(1 - \cos\varepsilon) = 2\,L_k\,I_\varepsilon. \tag{5a}$$

Der Wert von ψ_ε entspricht der gestrichelten Fläche unter der Spannungskurve (Bild 2b). Aus (5) folgt, daß die Kommutierungsstromreserve für kleine Werte von ε sehr klein ist. Beispielsweise für $\varepsilon = 10°$, $\psi_m = 1$, $L_k = 0{,}15$ beträgt $I_\varepsilon = 5\,\%$ vom Nennstrom; oder für $\varepsilon = 5°$, $\psi_m = 1$, $L_k = 0{,}15$ beträgt $I_\varepsilon = 1{,}2\,\%$ vom Nennstrom. Das heißt, I_ε ist kleiner als die Zwischenkreisstromschwankungen. Es muß auch beachtet werden, daß die durch Störungen und Fehler des Steuersatzes veranlaßte β-Änderungen größere ε-Änderungen nach sich ziehen können. Nach Berechnung des vollständigen Differentials in (4) unter der Voraussetzung, daß I_ε und ψ_m = konstant ist, gilt

$$-\sin\varepsilon\,\partial\,\varepsilon - \sin\beta\,\partial\,\beta = 0. \tag{6}$$

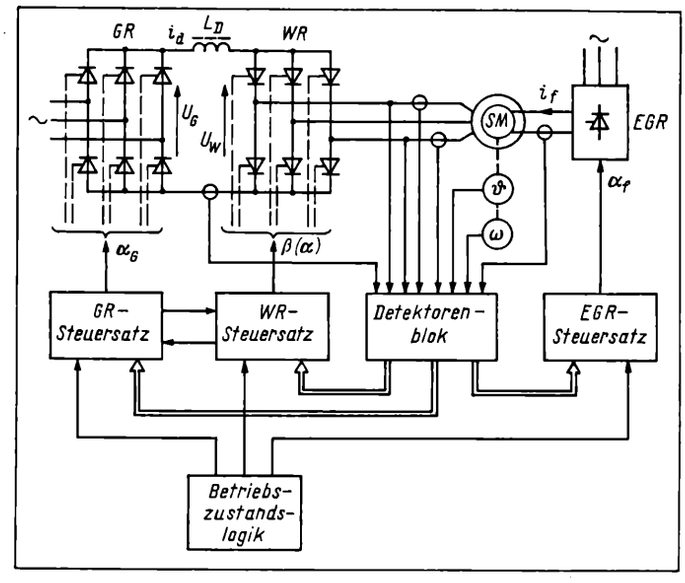


Bild 1. Blockschaltbild der Steuerstruktur des Stromrichtermotors

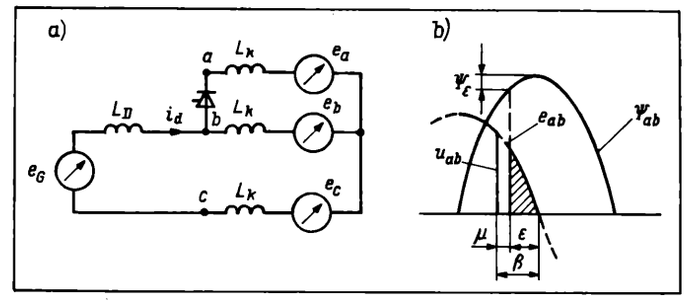


Bild 2. Kommutierung des Stromrichtermotors
a) Vereinfachte Ersatzschaltung,
b) Spannungs- und Flußzeitverläufe

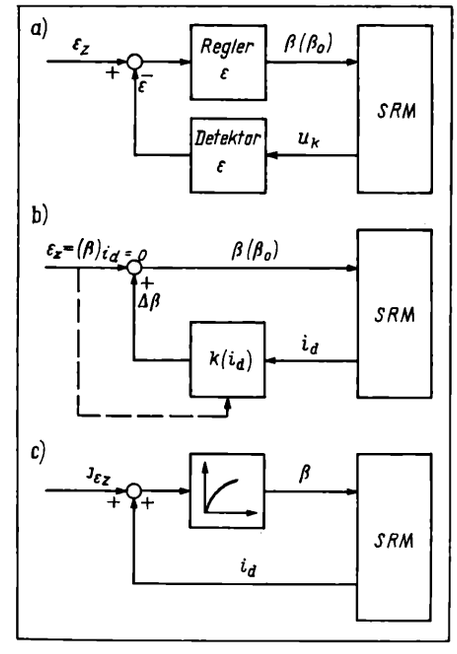


Bild 3. Steuerstrukturen des Wechselrichters
a) Regelung der Winkelreserve,
b) Kompensation des Belastungseinflusses auf die Winkelreserve,
c) Kompensation des Belastungseinflusses auf die Stromreserve

Mit $\beta = \varepsilon + \mu$ ergibt sich die Suszeptanz

$$\frac{\partial\,\varepsilon}{\partial\,\beta} = -\frac{\sin(\varepsilon + \mu)}{\sin\varepsilon}. \tag{7}$$

Bei großen Werten von μ (infolge des Belastungsanstiegs) und kleinen Werten von ε steigt die ε-Suszeptanz bei β-Änderungen an.

1.2. Steuerstrukturen des maschinenseitigen SR

Die bestehenden Wechselrichtersteuereinrichtungen des SRM können in zwei Gruppen eingeteilt werden, je nach dem, wie der Voreilwinkel gemessen wird:

— Einrichtungen mit Polradlagegeber (Polradtaktung)
— Einrichtungen mit Spannungssteuerung (Spannungstaktung).

Die Systeme mit Polradlagegeber ohne ε-Regelung arbeiten nur in geringem Belastungsbereich, wobei die Winkelreserve bei Belastungssteigerung abnimmt. Die Kennlinien der Systeme mit Spannungssteuerung (Taktung) sind dagegen günstiger, weil die Winkelreserve mit der Belastungszunahme viel langsamer sinkt. Damit der SRM im gesamten Betriebsbereich mit dem größtmöglichen Leistungsfaktor arbeitet, muß die Kommutierungswinkelreserve in der Nähe der Wechselrichtertrittgrenze stabilisiert werden. Zu diesem Zweck werden zwei Verfahren angewendet:

— Regelung der Winkelreserve (Bild 3a)
— Kompensation des Belastungseinflusses auf die Winkelreserve (Bild 3b).

Unter der Voraussetzung der Spannungstaktung ist das zweite Verfahren in der Praxis viel einfacher als das Regelungsverfahren.
Zunächst wird die Kompensationsstruktur besprochen. Für die Spannungstaktung soll das Kompensationssignal $\Delta\beta$ gleich dem Überlappungswinkel sein. Die Verknüpfung des Kommutierungswinkels mit der Belastung folgt aus (4) und (1).
Es gilt

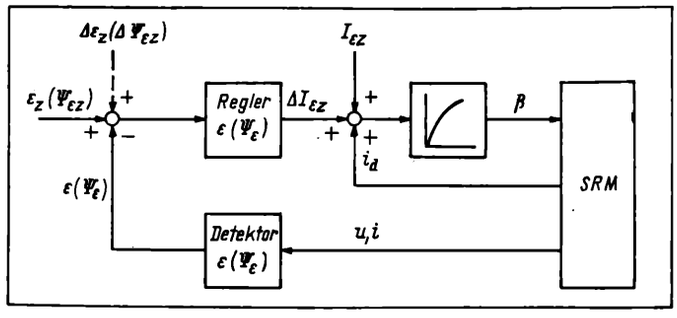
$$\mu = \arccos\left(\cos\varepsilon - \frac{2\,L_k}{\psi_m} I_d\right) - \varepsilon\,. \tag{8}$$

Der Kommutierungswinkel in (8) hängt von dem Belastungsstrom und auch von der vorausgesetzten Winkelreserve ε ab. Dessen Nachteil ist aber, daß auch der nichtlineare Funktionsgeber im Kompensationskreis gemäß der Änderungen der Winkelreserve modifiziert werden muß. Dieser Fehler ist jedoch vermeidbar, wenn die Stromreserve I_ε statt der Winkelreserve eingeführt wird.
Nach Bestimmen des cos ε aus (5) und Einsetzen in (4) erhält man

$$\beta = \arccos\left[1 - \frac{2\,L_k}{\psi_m}(I_d + I_\varepsilon)\right]. \tag{9}$$

Die Struktur der Kompensationsschaltung ist im Bild 3c) dargestellt. In den analogen Simulationsuntersuchungen war (9) mit Hilfe eines nichtlinearen Gliedes (Quadratwurzel) approximiert. Die erwarteten Vorteile der Struktur nach Bild 3c wurden nach weiteren Analysen bestätigt. Die Kommutierungsreserve in breitem Belastungsbereich sowie die vorgegebenen Werte der Stromreserve I_ε werden gut stabilisiert. Die entsprechende Winkelreserve, bei der der Wechselrichter zuverlässig gearbeitet hat, ist jedoch viel größer als 10°.
Die Regelungssysteme mit unmittelbarer Berechnung der Winkelreserve ε oder mit Kommutierungswinkelmessung arbeiten mit größerer Genauigkeit als die Kompensationssysteme. Deshalb könnten sie theoretisch einen Betrieb an der WR-Trittgrenze mit kleinen ε-Werten ermöglichen. Wegen der Wirkung der Rückkopplungsschleife entstehen aber dynamische Probleme. Die Winkel ε, μ, β sind digitale Größen, deren Werte mit drehzahlabhängiger Frequenz variieren. Das dynamische Verhalten des Regelkreises ist also auch stark drehzahlabhängig, deswegen sind die analogen I- bzw. PI-Regler mit konstanten Parametern nicht anwendbar. Bei der Anwendung eines I- bzw. PI-Digitalreglers ist seine Arbeitsgeschwindigkeit an die Drehzahländerung gut angepaßt, weil die in der Meßanordnung entstandene Verzögerung auch drehzahlabhängig ist. Der Mindestwert der Verzögerung ist einem Stromrichterarbeitstakt gleich und hängt von der Detektorkonstruktion ab. Die Dynamik des Regelkreises ist ebenso mit dem Verstärkungsfaktor der Regelstrecke $\Delta\varepsilon/\Delta\beta$ verbunden. Der Verstärkungsfaktor $\Delta\varepsilon/\Delta\beta$ ist

Bild 4. Steuerstruktur des Wechselrichters mit Kompensation und Regelschleife



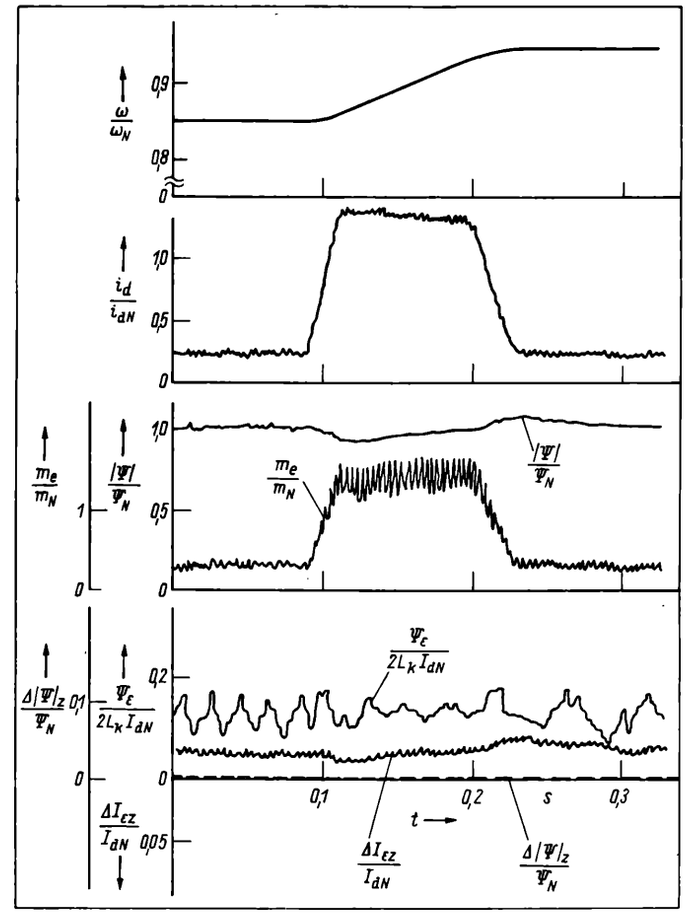


Bild 5. Verhalten des Stromrichtermotors beim Drehzahlsollwertsprung ($\omega = 0{,}95\,\omega_N$; ohne Übererregung und Forcierung des Kommutierungsreservesignals)

vom Arbeitspunkt abhängig, deswegen ist die Reglereinstellung sehr kompliziert. Es sollte im Prinzip ein adaptiver Regler benutzt werden. Falls dennoch ein linearer Regler angewandt wird, muß die Reglerverstärkung klein sein, um eine stabile Arbeit im ganzen Betriebsbereich zu sichern. Das führt allerdings zu einer relativ großen Ausregelzeit, die bis zu zehn Arbeitstakten betragen kann. Es ist aber möglich, die Reglergeschwindigkeit wesentlich zu erhöhen, wenn ein nichtlineares Glied mit einer Kennlinie nach (9) zwischen den Regler und die Regelstrecke eingeführt wird.
Es scheint, daß die beste Lösung durch Verknüpfung von Kompensation und Regelung zu erreichen ist. Die Aufgabe des verhältnismäßig langsamen Reglers wäre, den statischen Fehler auszuregeln, während die grundsätzlichen Änderungen über die Kompensationsschleife beseitigt werden. Die Struktur mit Kompensation und Regelschleife ist im Bild 4 dargestellt.

1.3. Regelung an der Wechselrichtertrittgrenze

Es wurden bisher nur die stationären Regelungsprobleme besprochen, die mit dem Kommutierungs-Reserveregelkreis verbunden sind. Drehzahländerungen, insbesondere schnelle Stromänderungen, wirken nachteilig auf die ε (ψ_ε)-Regelkreise, die wegen des diskreten Charakters der Stromrichtersteuerung und der damit verbundenen Totzeit die dynamischen Stromänderungen nicht einholen. Kritische Arbeitsbedingungen für den ε (ψ_ε)-Regelkreis entstehen bei niedrigen Drehzahlen und hohen Belastungen. Das Wechselrichterkippen ist nicht zu vermeiden, wenn während einer Kommutierung der Stromanstieg größer als die dynamische Kommutierungsstromreserve ist. Die dynamische Stromreserve ist etwa zweimal größer als die statische Stromreserve, weil (bei vernachlässigter Resistanz) der Kommutierungswinkel vom arithmetischen Mittelwert (vom Anfangs- und Endwert) des Stroms abhängt. Um einen stabilen Wechselrichterbetrieb an der Trittgrenze bei transienten Vorgängen zu sichern, wurden folgende Maßnahmen untersucht:

1. Begrenzung der Änderungsgeschwindigkeit des Stromsollwerts.
Die Begrenzung der Stromsollwertableitung erhält man durch Einführung eines Ableitungsbegrenzers zwischen dem Drehzahlregler und Stromregler. Das Begrenzungsniveau wird so ausgewählt, daß

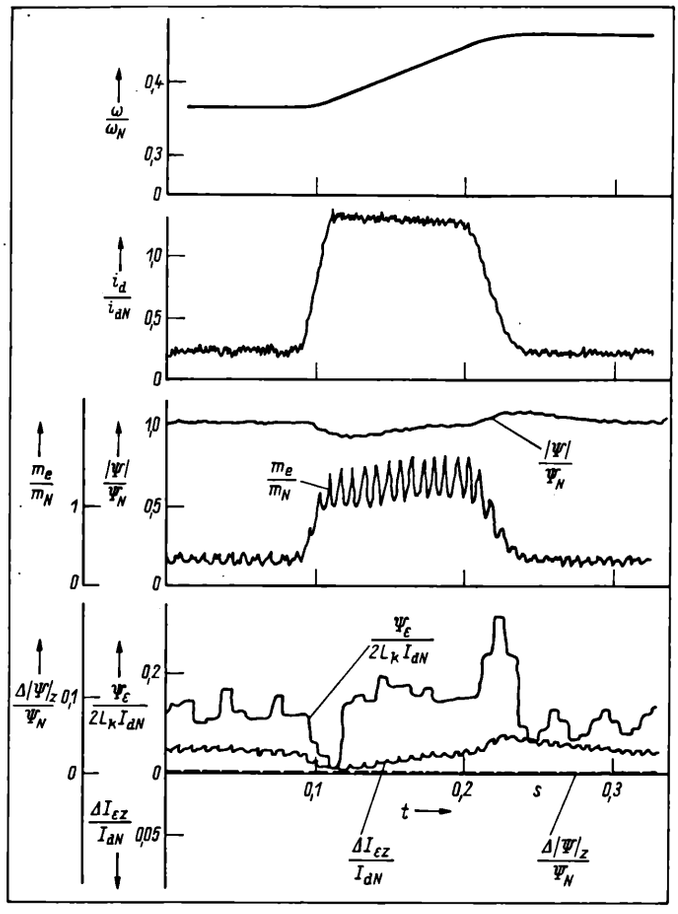


Bild 6. Verhalten des Stromrichtermotors beim Drehzahlsollwertsprung ($\omega = 0{,}47\ \omega_N$; ohne Übererregung und Forcierung des Kommutierungsreservesignals)

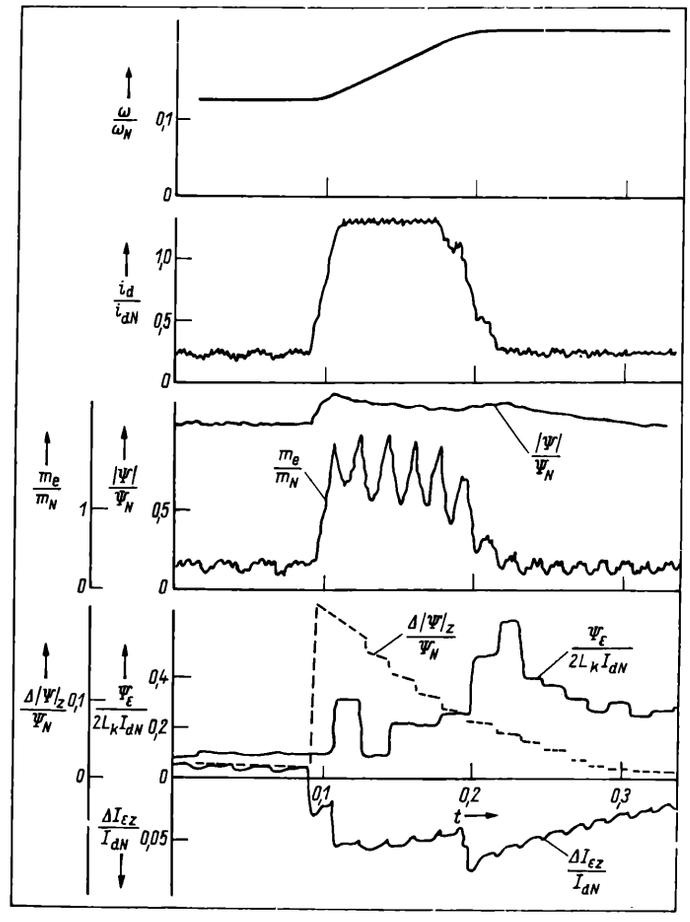
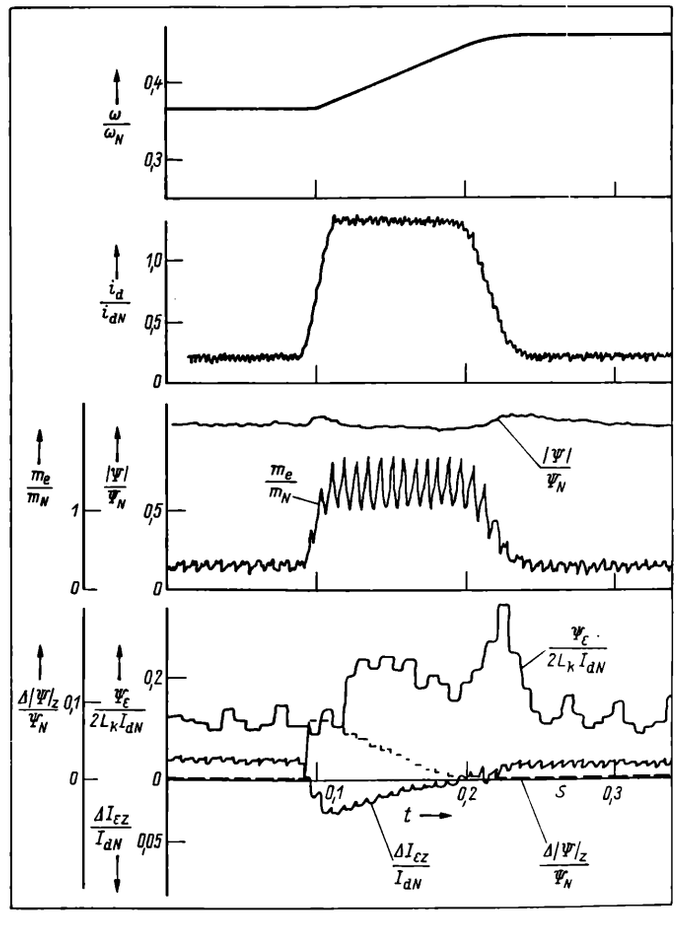


Bild 7. Verhalten des Stromrichtermotors beim Drehzahlsollwertsprung ($\omega = 0{,}47\ \omega_N$; mit Übererregung und Forcierung des Kommutierungsreservesignals)

Bild 8. Verhalten des Stromrichtermotors beim Drehzahlsollwertsprung ($\omega = 0{,}22\ \omega_N$; mit Übererregung und Forcierung des Kommutierungsreservesignals)



bei Stoßbelastung die Stromsteilheit nur unbedeutend reduziert wird. Der Begrenzungseinfluß ist dagegen während sprunghafter Drehzahlsollwertänderung gut sichtbar, da in diesem Fall die Stromsteilheit maximal ist. Es hat sich herausgestellt, daß diese Lösung nur bei höheren Drehzahlen (oberhalb 0,7 ω_N) effektiv ist.

2. Sprunghafter Anstieg des Sollwertes der Kommutierungsreserve während eines nichtstationären Betriebs im Stromregelkreis.

Zur Unterscheidung des transienten Vorgangs vom stationären Zustand wird wiederum ein Stromableitungsbegrenzer benutzt. Die Überschreitung des eingestellten Stromableitungsniveaus erweckt ein zusätzliches Sollwertsignal $\Delta\varepsilon_z$ ($\Delta\psi_{\varepsilon z}$) auf dem Eingang des Kommutierungsreservereglers (Bild 4). Um die Kommutierungsreserve nicht unnütz (bei hohen Drehzahlen) zu vergrößern, wird das Signal $\Delta\varepsilon_z$ ($\Delta\psi_{\varepsilon z}$) als umgekehrt proportional zur Drehzahl angenommen. Da aber infolge des großen Voreilwinkels β eine zweifache Kommutierung eintreten kann, muß auch das Zusatzsignal $\Delta\varepsilon_z$ ($\Delta\psi_{\varepsilon z}$) begrenzt werden. Infolgedessen ist diese Maßnahme bei niedrigen Drehzahlen des Motors uneffektiv.

3. Übererregung des Motors während eines steilen Stromanstiegs.

Ein zusätzliches Signal $\Delta\psi_z$ wird (abhängig von der Ableitung des Stroms i_d) zum Flußreglereingang geführt und während dreier Wechselrichtertakte konstant gehalten; nach diesem Zeitintervall wird das Signal stufenweise reduziert.

Keine genannte Maßnahme ist, wenn separat angewandt, ausreichend, um einen stabilen und effektiven Betrieb während der transienten Vorgänge zu gewährleisten. Dagegen kann die gleichzeitige Anwendung aller drei Verfahren, wie das die analoge Simulation bestätigt hat, einen zuverlässigen und effektiven Betrieb ermöglichen, bei dem die dynamischen Eigenschaften des SRM — im Vergleich mit dem stromrichtergespeisten Gleichstrommotor — nur etwas schlechter sind.

Die Diagramme in den Bildern 5 und 6 stellen die Simulationsergebnisse nach einer sprunghaften Änderung des Drehzahlsollwerts für entsprechend große und kleine Winkelgeschwindigkeit dar. In diesem Fall gibt es keine Übererregung und Forcierung des Kommutierungsreservesignals. Wie aus dem Flußreserveverhalten folgt, wirkt die grundsätzliche Regelstruktur (ohne Forcierungsglieder) nur bei höheren Drehzahlen effektiv; für eine kleine Winkelgeschwindigkeit (etwa 0,4 ω_N) tritt das Wechselrichterkippen ein. Um

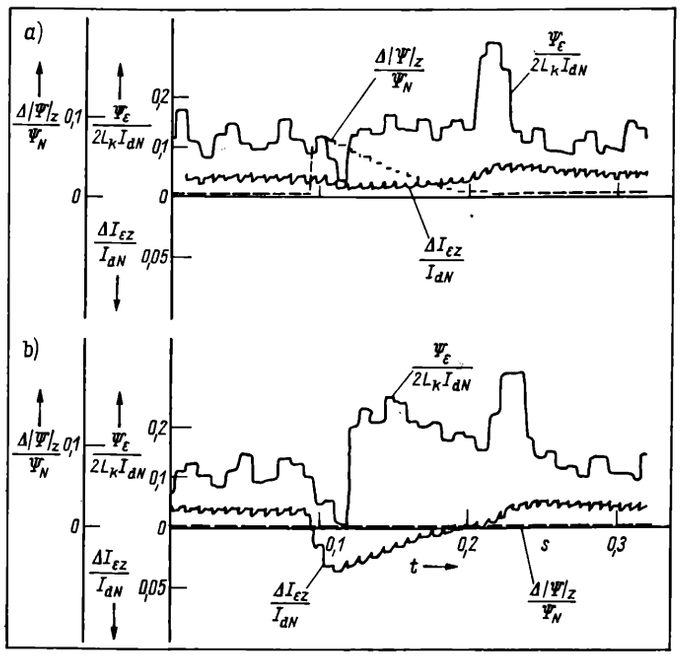


Bild 9. Verhalten des Stromrichtermotors beim Drehzahlsollwertsprung ($\omega = 0{,}47\ \omega_N$)
a) mit Übererregung, ohne Forcierung des Kommutierungsreservesignals,
b) ohne Übererregung, mit Forcierung des Kommutierungsreservesignals

die Vorgänge nach dem Kippen registrieren zu können, wurde für den nichtgelöschten Thyristor eine Zwangskommutierung eingeführt.

In den Bildern 7 und 8 ist der Fall mit Übererregung und Forcierung der Kommutierungsreserve für kleine Drehzahlen dargestellt. Aus dem Vergleich der Bilder 7 und 9 folgt, daß die Übererregung oder die Forcierung der Kommutierungsreserve allein den Wechselrichter nicht vor dem Kippen schützen. Es muß gleichzeitig die Forcierung der Erregung und der Kommutierungsreserve eingeführt werden.

2. Schlußfolgerungen

Für die Bewertung der Wechselrichtersteuerung des SRM, im Betrieb mit konstantem Fluß, eignet sich die Strom- oder Flußreserve besser als die Kommutierungswinkelreserve. Die Schonzeit als Maß der Kommutierungsreserve ist uneffektiv.
Es ist vorteilhaft, statt der Spannungstaktung eine Flußtaktung einzuführen. Dieses System fügt die Einfachheit der Spannungstaktung (kein Lagegeber an der Motorwelle) und die Störunempfindlichkeit der Polradlagetaktung zusammen.
Die vorgeschlagene Regelstruktur mit einer Stromkompensationsschleife für die Steuerung der Kommutierungsreserve sichert eine Linearisierung der Regelstrecke ohne adaptive Regler. Die gleichzeitige Erfassung der kleinen Kommutierungsreserve (d.h. hoher Leistungsfaktor und Wirkungsgrad) wie auch eine gute Dynamik des Antriebs fordern eine besondere Lösung des Steuerungssystem des gesamten SRM.

Literatur

[1] *Bühler, H.:* Einführung in die Theorie geregelter Drehstromantriebe. Band 2. Anwendungen. Basel u. Stuttgart: Birkhäuser Verlag 1977, S. 95
[2] *Harashima, F.; Iwamoto, K.; Naitoh, H.:* Stability Analysis of Constant Margin — Angle Controlled Commutatorless Motor. IEEE Transactions on Industry Applications IA-19 (1983) 5, S. 708

EA 5795

Entwicklung von starkstromtechnischen Einrichtungen in ZSE Prag

Mehr als 80% der in der ČSSR hergestellten starkstromtechnischen Einrichtungen stammen aus den Werken für Starkstromtechnik in Prag, dem Konzern ZSE. Das Herstellungsprogramm umfaßt Schweißtechnik, Elektromotoren, Öfen für thermische und chemisch-thermische Werkstoffbehandlung, Verteiler, Transformatoren, Stromverteilungselemente, Gleichrichter, unterschiedliche Reglertypen, Schutzschalter und andere Einrichtungen, die in letzter Zeit immer stärker von Elektronik beeinflußt werden. Entwickelt wurden bereits elektronische Temperaturregler, Drehzahlregler, Regler der Beleuchtungsstärke und Heizleistungsregler. Die Elektronik kommt in hohem Maße auch bei vier Mezomatic-Antrieben zur Geltung, die zur Steuerung des Ein- und Dreikoordinatenvorschubes von Werkzeugmaschinen, Robotern, Manipulatoren und Positioniergeräten geeignet sind.
Auf der letzten Internationalen Maschinenmesse in Brno im September 1987 schloß die Außenhandelssektion von ZSE bedeutende Verträge für die Lieferung von Mezomatic-Antrieben für die UdSSR im Werte von 99 Mill Kčs ab.
Zu neuen Erzeugnissen des Konzerns ZSE zählen auch spezielle Stromwandler in Querlochausführung, die zur Speisung von Schutz-, Sicherungs- und Meßkreisen in Kraftwerken und anderen energietechnischen Anlagen bestimmt sind. Sie sind als Einleiterwandler mit Rundloch zum Aufstecken auf einen umhüllten Leiter ausgeführt, der als Primärwicklung dient. Diese speziellen Speiseeinrichtungen von Schnelldifferentialschützen eliminieren die Störanfälligkeit energetischer Blöcke und tragen wesentlich zur Ökonomie der Stromlieferung in das Verteilernetz bei. Berechnungen des Forschungsinstitutes für elektrische Geräte VÚEP in Brno ergaben, daß sich die Investitionskosten bereits nach einem halben Jahr amortisieren. Die Einsparungen an fossilen Brennstoffen bei Vermeidung von Blockausfällen betragen jährlich etwa 2000 Tonnen Bezugsbrennstoff.
Die Querlochstromwandler sind bereits im tschechoslowakischen Wärmekraftwerk Mělník im Einsatz, eine weitere Lieferung wird derzeit für zwei 250-MW-Blöcke des Kraftwerkes Felton auf Kuba realisiert. In Vorbereitung ist auch der Abschluß eines Liefervertrages mit der Volksrepublik China.

EA 2837

FACHTAGUNGEN

Bericht über die CIRED-Konferenz 1987 9. International Conference on Electricity Distribution Liège (Belgien), 4. bis 8. Mai 1987

Die internationale Organisation CIRED (Internationale Konferenz über Elektroenergie-Verteilungsnetze) befaßt sich mit den Problemen der Planung, Ausrüstung und dem Betrieb von Elektroenergieverteilungsnetzen von 6 bis 110 kV in Ergänzung zu dem Arbeitsgebiet der CIGRE. Seit der 1. CIRED-Konferenz im Jahre 1971 mit 588 Teilnehmern aus 29 Ländern haben die alle 2 Jahre stattfindenden Konferenzen zwischenzeitlich eine weltweite Bedeutung erlangt. So wies der 9. Kongreß der CIRED mit 1124 Fachleuten aus 42 Ländern (vorläufige Angaben) eine weiter angewachsene starke Beteiligung auf.

Bestandteil der CIRED 87 war eine Ausstellung von 31 Elektrofirmen aus Belgien, Frankreich, Großbritannien, Schweden, der BRD, Dänemark, Griechenland und der Schweiz zum Thema „Ausrüstungen in Unterstationen". Vorwiegend wurden Exponate der MS-Schaltanlagentechnik und der Leittechnik gezeigt, zumeist in einem direkten Bezug zu den Vorzugsthemen der Konferenz stehend. Das Einführungsreferat hielt *M. Boiteux*, Präsident der Weltenergiekonferenz und Generaldirektor der EDF. Er sprach zu Fragen der Energiereserven in der Welt und in Europa sowie der sich daraus ergebenden größeren Bedeutung der Elektroenergie als Faktor der Unabhängigkeit und Modernisierung der Industrie.

Anschließend wurden in 6 Sessionen aktuelle technische Probleme ebenso wie Themen der Forschung und Entwicklung der Elektroenergieverteilung in öffentlichen und industriellen Netzen diskutiert.

84 Berichte aus 21 Ländern beschäftigten sich mit folgenden Themen:

Sitzung 1: Ausrüstungen von Umspannwerken und Trafostationen
Sitzung 2: Störungen und Schutz in Verteilungsnetzen
Sitzung 3: Kabel und Freileitungen
Sitzung 4: Betrieb und Steuerung in öffentlichen Verteilungsnetzen
Sitzung 5: Entwurf, Planung und Betrieb von Industrienetzen
Sitzung 6: Entwurf und Planung öffentlicher Verteilungsnetze.

Nachstehend werden ausgewählte Schwerpunkte der einzelnen Sitzungen dargestellt:

Fachliche Auswertung

Sitzung 1: Ausrüstungen von Umspannwerken und Trafostationen

Die Sitzung wurde von *G. Sisouw de Zilwa* (NL) geleitet, der Berichterstatter war *R. Hoekema* (NL).

Folgende 3 Vorzugsthemen wurden behandelt:

— Forderungen an das Betriebsverhalten von gekapselten MS-Schaltanlagen im Störungsfall (innere Lichtbögen und Fehler an Kabelendverschlüssen) und Langzeitverhalten unter Berücksichtigung der Umweltfaktoren — Betriebserfahrungen.

— Anwendung neuer Schaltgeräte und Zusatzausrüstungen für Umspannwerke und Stationen sowie neue Wege der Planung und Gestaltung und ihr Einfluß auf die Ökonomie.

— Ortsnetztransformatoren

Belastungsregime, wirtschaftliche Betriebsweisen, Tendenzen auf dem Gebiet der Konstruktion und der Nutzung neuer Dielektrika sowie Betriebserfahrungen.

Bei den metallgekapselten luft- oder gasisolierten MS-Schaltanlagen stehen die Bemühungen um sichere, zuverlässige und wartungsarme Ausrüstungen im Vordergrund. Ein optimaler Personenschutz ist zu gewährleisten.

Die Diskussion zeigte hinsichtlich des Personenschutzes sehr unterschiedliche Standpunkte. Bei inneren Lichtbögen wurde einerseits eine direkte Ableitung der entstehenden Gase ins Freie vorgeschlagen und andererseits wurden die hohen Kosten dieser Lösung und die Gefahr für Dritte hervorgehoben.

Gemäß IEC-Empfehlung 298 sind zwischen Hersteller und Nutzer entsprechende Vereinbarungen abzuschließen. Es wurde festgestellt, daß für die Prüfung der Schaltanlagen hinsichtlich Gefährdung noch keine Vorschriften zur Dimensionierung der Prüfräume, der Kabelkanäle und der Aufstellung der Schaltanlagen im Raum vorhanden sind.

Am Beispiel der SF_6-isolierten Kleinschaltanlage MINEX-C wurde ein serienmäßig eingebauter Störlichtbogenbegrenzer vorgestellt. Eine geringe Deformation der Gehäusewand infolge des durch einen Störlichtbogen ansteigenden Anlageninnendrucks führt zur Einschaltung eines Schnellerders (30 bis 60 ms).

Übereinstimmend wurde festgestellt, daß es ökonomischer ist, das Entstehen von Störlichtbögen zu verhindern, als mit allen Mitteln und großem Aufwand die Auswirkungen von Störlichtbögen beherrschen zu wollen. SF_6-isolierte MS-Anlagen werden zunehmend eingesetzt (Frankreich: 200000 Unterstationen mit SF_6-isolierten MS-Anlagen in Betrieb). Die Betriebserfahrungen und Langzeiterfahrungen mit luft- und feststoffisolierten Schaltanlagen sind positiv. Während der niederländische Beitrag (e 03) über sehr geringe Fehlerraten von gießharzisolierten Anlagen nach 25 Jahren Betriebszeit berichtete, informierte der Beitrag (e 04) aus der BRD über eine durchschnittliche Reduzierung der Isolationsfestigkeit um 17% nach einer 20jährigen Betriebszeit bei luft- und feststoffisolierten MS-Anlagen. Insbesondere Blitzüberspannungen in Abhängigkeit von Kabel- und Freileitungsanschlüssen führten zu Störungen bei feststoffisolierten Anlagen.

Trotz unterschiedlicher Aussagen und anzuzweifelnder Vergleichbarkeit muß im allgemeinen mit einem Absinken der Isolationswerte infolge Alterung gerechnet werden. Schmutzablagerungen und Feuchtigkeit in der Anlage sowie Temperatureinfluß beschleunigen diesen Alterungsprozeß.

Eine sinnvolle ökonomische Vorortprüfung (Wiederholungsprüfung) der Isolationsfestigkeit ist kaum möglich — Stoßspannungsprüfungen in den Anlagen während der Betriebszeit werden abgelehnt.

Bei der Diskussion um neue Schaltgeräte und Zusatzeinrichtungen standen im Mittelpunkt die Weiterentwicklung und Vervollkommnung aller 3 Löschprinzipien für MS-Leistungsschalter (Öl, Vakuum, SF_6) und der zunehmende Einsatz mikrorechnergeführter Schutz- und Steuertechniken einschließlich Diagnosesystemen im MS-Bereich.

Während ein Diskussionsbeitrag der BRD über rechneroptimierte Verbesserungen an ölarmen Leistungsschaltern, dem Erreichen von Wartungsintervallen von 10 Jahren und einem stabilen Langzeitverhalten des Öles von > 10 Jahren berichtete, wurde in einem belgischen Beitrag dieses Wartungsintervall angezweifelt und über erfolgreiche rechnergestützte Optimierungsuntersuchungen am Vakuum-Leistungsschalter informiert. In einem japanischen Beitrag wurde ein Vakuum-Leistungsschalter mit Diagnosesystem in Form einer elektronischen Zusatzbaugruppe für 5 Funktionen vorgestellt. In Verbindung mit zunehmender Fernsteuerung und Automatisierung der Stationen ist diesen Diagnosesystemen unter Einbeziehung veränderter Instandhaltungskonzepte auch im MS-Bereich zukünftig eine verstärkte Bedeutung beizumessen.

Gesamtwirtschaftliche Betrachtungen führten auch zu vielfältigen Überlegungen, eine technische und wirtschaftliche Optimierung des Verteilungsnetzes und des Stationskonzeptes vorzunehmen. Der Diskussionsbeitrag der DDR (THZ) zu Problemen des Einsatzes von Stationen mit vereinfachter MS-Schaltanlage hinsichtlich Betriebsführung, Fehlerortung und Versorgungszuverlässigkeit auf Grund bisheriger Betriebserfahrungen nahm aktuell zu diesem Schwerpunkt Stellung.

Der Beitrag (e 06) stellte zu diesem Thema eine neue Methode der Anordnung von Leistungsschaltern im MS-Maschennetz vor. Durch eine hierarchische Steuerung der Schalter kann ihre Anzahl von 30 für 14 Transformatoren auf 13 reduziert werden.

Ein neues Schaltgerät für den Schutz von Transformatoren wurde von britischen Geräteherstellern im Beitrag (e 09) vorgeschlagen. Es kann als eine Kombination aus SF_6-Sicherung und einem Leistungsschalter ohne bewegte Teile angesehen werden. Ebenfalls in einem britischen Beitrag (e 16) wurde ein kleinräumiger und kostengünstiger Gießharzverteiler (RDU-Ring, Disconnecting Unit), der nur im stromlosen Zustand betätigt werden darf, vorgestellt. Das Auftrennen, Erden, Kurzschließen und Prüfen wird durch spezielle Stecker realisiert.

Ebenfalls diesem Thema zuzuordnen sind die von der EDF gezeigten MS/NS-Transformatoren mit konstruktiv integrierter MS-Einspeisung und NS-Schaltanlage, die die Aufgabe einer sehr kompakten Kleinstation übernehmen.

In den Beiträgen und der Diskussion über Ortsnetztransformatoren standen die wirtschaftlichen Vorteile von verlustarmen Transformatoren im Vordergrund. Ein bulgarischer Beitrag (e 12) schlug Auswahlkriterien für den Einsatz von Öl- oder Trockentransformatoren vor, und ein vereinfachter Stufenschalter für Transformatoren für 6 kV bis 110 kV wurde in einem chinesischen Beitrag (e 19) vorgestellt.

Berichte der Sitzung 1

e 01 *Grassner* (AT): Beständigkeit gegen die Auswirkungen eines inneren Lichtbogens hoher Intensität in metallgekapselten MS-Schaltanlagen. Konsequenzen für die Aufstellungsräume und die Umgebung — Personenschutz

e 02 *Dides* u.a. (F): Betriebssicherheit von metallgekapselten SF_6-MS-Schaltanlagen

e 03 *Noordhuis* u.a. (NL): Langzeitverhalten von feststoffisolierten MS-Schaltanlagen

e 04 *Heiss* u.a. (BRD): Die Spannungsfestigkeit von MS-Schaltanlagen bei Impulsspannungsbeanspruchung und deren Entwicklung während der Lebensdauer

e 05 *Damstra* u.a. (NL): MS-Netzbedingungen mit erhöhter TRV-Beanspruchung des Hauptleistungsschalters

e 06 *Coomer* u.a. (AU): Eine kostengünstige modulare Station für hohe Lastdichte

e 07 *Bumberger* (AT): Steuerungs- und Überwachungssystem für MS-Schaltanlagen mit Lichtleiterübertragung und mikroelektronischen Steuerelementen

e 08 *Legros* u.a. (BE): Neue Forschungsrichtungen für eine Konzeption eines wartungsfreien Schalters

e 09 *Dakes* (GB): Eine neue Methode des Schutzes von MS-Transformatorstromkreisen

e 10 *Matsunaga* u.a. (JP): Leistungsschalter mit Selbstdiagnosefunktion

e 11 *Nativel* u.a. (FR): Neue Gestaltung der Steuerungstechnik von HS/MS-Umspannwerken

e 12 *Pelovsky* (BU): Die optimale Wahl von MS-Öltransformatoren oder MS-Trockentransformatoren

e 13 *Fisher* u.a. (GB): Tendenzen der Entwicklung und Nutzung von verlustreduzierten Verteilungstransformatoren

e 14 *Salvatore* u.a. (IT): Eine neue Serie von ENEL-Transformatoren mit reduzierten Verlusten

e 15 nicht eingereicht

e 16 *Clarke* u.a. (GB): Die Ringtrenneinheit mit Sicherungen — ein neues Netzschutzkonzept

e 17 *Schemann* u.a. (BRD): Transformatorenschutz in Stationen mit SF_6-isolierter Schaltanlage (Ring Main Unit)

e 18 *Maurer* u.a. (BRD): Mobile 20-kV-Station

e 19 *Ma Yan-Xu* (CN): Vereinfachter Stufenschalter für Transformatoren zwischen 6 und 110 kV

Sitzung 2: Störungen und Schutz in Verteilungsnetzen

Die Sitzung stand unter Leitung von *P. Pirotte* (BE), der Berichterstatter war *M. Couvreur* (BE).

Nachstehende 3 Vorzugsthemen wurden behandelt:

— Einfluß von Störungen hervorgerufen durch Haushalte, Industrie sowie dem Netz der Abnehmer (Harmonische, Schieflast, Flicker, Spannungsabsenkungen). Elektromagnetische Verträglichkeit von Schwachstromsystemen.
— Entwicklung des Schutzes in MS- und NS-Netzen

Selektivität — Vorortautomatiken

Einfluß von verteilter industrieller oder privater Elektroenergieerzeugung.
— Überspannungen in MS- und NS-Netzen, Ursachen und Schutzmöglichkeiten, Isolationskoordination in MS-Netzen, Verhalten bei Kurzschlußströmen.

Zu den Problemen der Elektroenergiequalität erfolgte eine außerordentliche rege Diskussion. Der zunehmende Einsatz von Betriebsmitteln und Verbrauchern mit nichtlinearer Kennlinie im öffentlichen und industriellen Verteilungsnetz führt zu einem Anwachsen des Anteils an Oberschwingungen. Eine strenge koordinierte technisch-ökonomische Vorgehensweise zur wirksameren und optimalen Beherrschung der Oberschwingungen zwischen Produzenten, Anlagenbau, Energieversorgung und Betreiber wurde allgemein gefordert.

Im allgemeinen stehen Rechnerprogramme zur Ermittlung der Oberschwingungsverteilung zur Verfügung, und es erfolgen umfangreiche meßtechnische Untersuchungen im Netz. Im Bericht c 03 wurde über einen Algorithmus zur numerischen Berechnung und Bewertung der Harmonischen über 4 Spannungsebenen am Beispiel eines italienischen und spanischen Netzes informiert und im Bericht c 04 wurde ein Überblick über das räumlich und zeitlich unterschiedliche Auftreten von Harmonischen im MS- und NS-Verteilungsnetz der Elfenbeinküste gegeben.

Ebenso wie in anderen öffentlichen Netzen überwiegt hier die 5. Harmonische, aber im Gegensatz zu Erfahrungen anderer Länder weist das NS-Netz gegenüber der MS-Ebene einen weitaus geringeren Anteil an Oberschwingungen aus. Die Messungen erfaßten Oberschwingungen bis zur 25. Harmonischen.

Zu einem belgischen Beitrag (c 01) wurde der Einfluß von Kompensations-Kondensatorenanlagen im 70 kV (10 Einheiten zu je 20 Mvar) und 150 kV Netz (6 Einheiten zu je 75 Mvar) auf das MS- und NS-Netz gezeigt.

Einschalteigenschwingungen und eine mögliche Verstärkung von Oberschwingungen im Netz wurden diskutiert. Über umfangreiche Messungen an 50 Knotenpunkten im MS- und NS-Netz der BRD zur Ermittlung der Oberschwingungsbelastung durch Industrie und Haushalte wurde in der Diskussion berichtet.

Die international gebräuchlichen Berechnungs- und Meßverfahren zur Ermittlung der Oberschwingungsverteilung werden zunehmend durch statistische Verfahren ergänzt. In der Diskussion über den Wert statistischer Modelle hinsichtlich der Festlegung und der Überprüfung von Grenzwerten einer zulässigen Oberwellenbelastung wurde auf die dazu notwendigen Langzeituntersuchungen im Netz verwiesen.

Haushaltgeräte und Geräte der Heimelektronik haben insgesamt wachsenden Einfluß auf die Elektroenergiequalität. So wird z.B. erwartet, daß künftig die zulässige Oberwellenbelastung in den Abendstunden bereits durch die eingeschalteten Fernsehgeräte ausgeschöpft wird.
Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von Steuerleitungen war Inhalt des Berichtes c 02a. Dieser Bericht basiert auf dem CIGRE-Bericht 36-05 (1980) und behandelte an einem Beispiel die Einteilung der elektromagnetischen Umgebung in 6 Klassen.

Besondere Berücksichtigung fanden:
Blitz- und Schaltüberspannungen, elektrostatische Entladungen und netzfrequente Erdschlußströme. Daraus resultieren Empfehlungen für die Montage elektrotechnischer Anlagen und zur Durchführung von Störfestigkeitstests.

G. Goldberg, Präsident TC 77 der IEC, gab im Beitrag c 02b einen Gesamtüberblick über die verschiedenen Arten der Störbeeinflussung und der Festlegung von Verträglichkeitspegeln. Demnach unterscheidet man folgende elektromagnetische Beeinflussungen:
Oberschwingungen, höherfrequente Schwingungen (u.a. Synchronmotoren, Lichtbogenöfen), Informations- und Signalisierungssysteme (bis 150 kHz), schnelle Spannungsänderungen (Einschaltvorgänge), Spannungseinbrüche und Spannungsunterbrechungen, Spannungsunsymmetrie im Drehstromnetz, Überspannungen sehr kurzer Zeitdauer (transiente Vorgänge), elektrostatische Entladungen, Beeinflussung durch Magnetfelder (u.a. Starkstromkreise, Sendefrequenzen).

In Fortführung der Diskussion ist zu erwarten, daß der Verträglichkeitspegel auf einen statistischen Schwellwert von 95% festgelegt werden wird.

Im Bericht c 06 wurde die Nutzung des UIE-Flickermeters beschrieben und ein Regelwerk für Großbritannien angekündigt. Ein Diskussionsbeitrag verwies auf den IEC-Bericht 868, der Regeln für die Flickermessung nennt. Die Frage nach der Definition eines noch zulässigen Flickers, der vom Verbraucher zu akzeptieren ist, blieb offen.

P. Stoecklein, Leipzig
K.-D. Haim, Zittau EA 2746

PATENTE

Schrittmotorsteuerung mit Mikrorechner

DD-WP: 253530
Int.-Cl.: H 02 P 8/00
Anmeldetag: 20. 10. 86
Anmelder: Ingenieurschule für Elektrotechnik, Velten

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine entsprechende Schaltung zu entwikkeln, durch die die Schrittfrequenz, entsprechend einer geforderten Zeitfunktion, erhöht und erniedrigt werden kann. Die Entscheidung, ob und wann die Frequenz geändert werden soll, wird durch den Mikrorechner festgelegt. Eine entsprechende Berücksichtigung ist zu gewährleisten. Es soll aus Gründen des Aufwandes und der nicht exakten Frequenzänderung auf einen Zähler-Zeigeberbaustein verzichtet werden.
Ein vom Mikrorechner erzeugtes Signal steuert einen Funktionsgenerator an. Er erzeugt eine Spannungs-Zeitfunktion, die in einem Spannungs-Frequenzwandler in eine Frequenz-Zeitfunktion gewandelt wird. Diese Frequenz wird als Taktfrequenz der Zentraleinheit des Mikrorechners genutzt. Die geforderte Änderung der Schrittfrequenz wird dadurch erreicht, daß ein die Schrittfrequenz erzeugendes Programm langsamer oder schneller abläuft, weil die Taktfrequenz der Zentraleinheit des Mikrorechners, entsprechend der Maßgabe des Funktionsgenerators, geändert wird.

D. Ufert, Berlin EA 2773

Verfahren und Schaltungsanordnung zur Synchronisation von rechnergestützten netzgelöschten Stromrichtern

DD-WP: 253526
Int.-Cl.: H 02 M 1/084
Anmeldetag: 23. 10. 86
Anmelder: Technische Universität Dresden

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Interruptbildung der Steuerung für den Mikrorechner durch eine vorteilhaft ausgebildete Steuerlogik zu ersetzen.
Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß in einer logischen Schaltung ein Synchronisationssignal am Setzeingang eines ersten RS-Flipflops sowie über einen Negator am Setzeingang eines zweiten RS-Flipflops anliegt und die Ausgangssignale der RS-Flipflops mit einem Taktsignal durch NAND-Gatter mit den Zähleingängen von Zählkanälen verbunden sind. Ein Rücksetzsignal ist mit dem negierten und nichtnegierten Synchronisationssignal mit NAND-Gattern logisch verknüpft. Die Ausgangssignale der NAND-Gatter liegen an den Rücksetzeingängen der RS-Flipflops an.
Durch die logische Schaltung werden die Zählimpulse der Zählfrequenz für die Zählkanäle unter Umgehung der Interruptlogik des Mikrorechnersystems genau zum Synchronisationszeitpunkt (Flankenwechsel des Synchronisationssignals) für eine Zeit kleiner $1/f$ freigeben. Die beiden Zählkanäle werden dabei abwechselnd zum Synchronisationszeitpunkt gestartet. Mit dem Reset-Impuls wird über die logische Schaltung erreicht, daß die Zählimpulsfreigabe für denjenigen Zählkanal wieder zurückgenommen wird, der für die Bildung des nächsten Zündverzögerungswinkels notwendig ist. Während der Zeit der Zählimpulssperre wird der von einem übergeordneten Algorithmus berechnete Zündverzögerungswinkel in Form der Zählerkonstante an den Zählkanal übergeben und bis zum nächsten Synchronisationszeitpunkt zwischengespeichert. Der durch den aktuellen Zählkanal zu realisierende Zündverzögerungswinkel liegt dabei zwischen 0° und 60°. Der gesamte Ansteuerbereich des netzgelöschten Stromrichters (0° bis 180°) wird durch Ausgabe entsprechender Zündmuster für Thyristoren überstrichen. Nach Ausgabe der Zündung steht der aktuelle Zählkanal bis zur Sperrung seiner Zählimpulse für die Bildung weiterer Zeitbedingungen zur Verfügung.

D. Ufert, Berlin EA 2771

Anordnung zum Berührungsschutz von Frontplatten elektronischer Baugruppen

DD-WP: 253329
Int.-Cl.: H 02 H 5/12
Anmeldetag: 13. 10. 86
Anmelder: Kombinat VEB EAW Berlin-Treptow, Zentrum für Forschung und Technologie

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zum Berührungsschutz von Frontplatten elektronischer Baugruppen, die in Geräten der Elektronik, Nachrichten- und Steuerungstechnik eingesetzt werden. Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine mechanisch sichere und elektrisch zuverlässige Verbindung zwischen Frontplatten und Baugruppenträger zu schaffen, die die Frontplatte in das Schutzleitersystem des Baugruppenträgers ohne zusätzlichen seitlichen Platzbedarf zu beanspruchen, einbezieht.
Erfindungsgemäß wird das dadurch erreicht, indem an der Frontplatte ein Kontaktmesser form- und kraftschlüssig elektrisch leitend in einem Raster angeordnet ist, das sich mit einer gabelförmigen, federnd ausgebildeten Kontaktbuchse im eingeschobenen Zustand der Baugruppe sicher im Eingriff befindet.
Die Kontaktbuchse führt Schutzleiterpotential, ist durch eine als Abdeckung ausgebildete Führungsschiene mechanisch geschützt und wird mit daran befindlichen Rastnasen gehalten. Durch einen Führungsstift wird über die in der Kontaktbuchse befindliche Freimachung die Kontaktbuchse in den Positionierlöchern positioniert. Das Kontaktmesser ist in der Frontplatte auf Umschlag verdrehsicher mit einer Nase in einer Ausklinkung befestigt und kann somit in der nächsten Rasterposition angeordnet werden. Zum Ausgleich der seitlich wirkenden Maßtoleranzen zwischen dem Kontaktmesser und der Kontaktbuchse ist am hinteren Teil der Kontaktbuchse eine Einschnürung vorhanden.
Das Schutzleiterpotential wird entweder über einen Schutzleiter an die Anschlußfahne oder über krallenartige Ausbildungen durch Schraubenverbindungen von der Schutzleiterpotential führenden Profilschiene des Baugruppenträgers übertragen.

D. Ufert, Berlin EA 2769

Elektrodynamischer Motor zur Erzeugung von Dreh- und Schubbewegungen

DD-WP: 253331
Int.-Cl.: H 02 K 41/100
Anmeldetag: 14. 10. 86
Anmelder: Technische Universität Dresden

Aufgabe der Erfindung ist es, den beweglichen Anker sowie den Stator des Motors so zu gestalten, daß ein integriertes Antriebssystem für Dreh- und Schubbewegungen entsteht, das die Nachteile von Antrieben nach dem Reluktanz-Prinzip vermeidet.
Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß eine rotationssymmetrische Tauchspule für die Erzeugung einer linearen und mindestens eine rechteckförmige, gekrümmte Spule zur Erzeugung einer Drehbewegung in einem gemeinsamen Stator angeordnet sind.
Der gemeinsame Stator besteht aus einem oder mehreren Permanentmagneten sowie Flußführungsteilen aus Weicheisen. Er bildet für die Spulen zwei getrennte oder auch nur einen einzigen radial zur Schubrichtung durchfluteten Luftspalt. Für die Tauchspule ist ein konzentrischer, geschlossener Ringluftspalt vorteilhaft aber nicht notwendig. Die Rotationsspule erfordert einen aus Teilstücken eines Kreisrings bestehenden Luftspalt derart, daß sich in jedem Teilstück stets nur axial zur Schubrichtung gerichtete Leiterzüge gleicher Stromrichtung befinden. Die Rückleiter liegen außerhalb des Luftspaltes oder in einem entgegengesetzt durchfluteten Teilstück.
Die Stromzuführung zum Anker erfolgt über Schleppkabel. Bei mehreren entgegengesetzt polarisierten Luftspaltteilstücken für die Rotationsspule oder bei aus mehreren Wicklungen bestehender Rotationsspule wird diese elektronisch kommutiert. Die Permanentmagnete können geometrisch sowohl innerhalb als auch außerhalb der Spulen angeordnet werden. Die Spulen selbst sind bezüglich des Luftspalts/Kurz- oder Langspulen.
Bei Stromfluß durch eine der beiden Spulen erfolgt nach dem elektrodynamischen Kraftgesetz eine lineare bzw. rotatorische Bewegung entsprechend der Strom- und Magnetfeldrichtung, die linear durch die Tauchspullänge und bezüglich des Drehwinkels durch den Sektorwinkel der Luftspaltteilstücke begrenzt wird. Bei kommutierter Rotationsspule ist der Drehwinkel nicht begrenzt.

D. Ufert, Berlin EA 2770

BUCHER

Moderne digitale integrierte Schaltkreise (russ.)

Von W. L. Schilo

Ein Handbuch

Moskau: Radio i svjaz 1987. 352 Seiten, 267 Bilder, 193 Tafeln, Kunstleder, 10,50 Mark

Das vorliegende Handbuch ist der Schaltungstechnik von Schaltkreisen mit niedrigem und mittlerem Integrationsgrad in TTL-, CMOS- und ECL-Technik gewidmet. Da in jeder der drei Schaltkreistechniken eine eigene Familie von Schaltkreisen angeboten wird, hat der Geräteentwickler die Möglichkeit, jede beliebige Schaltfunktion verlustleistungsarm (CMOS) oder mit geringer Schaltzeit (ECL) aufzubauen. Über spezielle Interfaceschaltkreise sind alle drei Familien miteinander zusammenschaltbar. Diese Vorgehensweise sichert ökonomische Gerätelösungen, die in hoher Stückzahl kostengünstig produziert werden können. Mit diesem Handbuch wendet sich der Autor an den jungen Geräteentwickler und die Studenten elektronischer Fachrichtungen, für die es oft schwer ist, die richtige Information zu aktuellen Schaltkreisen schnell und anwenderspezifisch aufzufinden. In je einem eigenen Hauptabschnitt werden deshalb die schaltungstechnischen Eigenschaften von TTL-, CMOS- und ECL-Schaltkreisen typspezifisch kurz, aber informativ abgehandelt. Dazu benutzt der Autor den Stromlaufplan, das logische Funktionsschaltbild, die Wahrheitstabelle und einige wenige Gleichungen.

Ergänzend dazu werden in zahlreichen Tafeln die statischen und dynamischen Besonderheiten der Schaltkreise innerhalb einer Familie herausgestellt. Außerdem wird dem Leser mitgeteilt, in welcher Schaltkreistechnik eine bestimmte logische Schaltfunktion in der Sowjetunion angeboten wird. In die Kennwertdiskussion wurden folgende Schaltkreisfamilien aufgenommen: Von den TTL-Familien die Serien K134 (74L), K155 (74), K131 (74H), K555 (74LS), K531 (74S), K1533 (74ALS), K1531 (74F), von den CMOS-Familien die Serien K176 (CD4000A), K561/564 (CD4000B) und von den ECL-Familien die Serien K500 (MC 10k) und K1500 (MC 100k).

Alle gegebenen Detailinformationen und Vergleiche sind Entscheidungshilfen, auf die der Entwickler bei seiner Gerätekonzeption gern zurückgreift. Unterschiede zu internationalen Schaltkreisfamilien werden ebenfalls diskutiert. Neuere Entwicklungen in der Sowjetunion sind berücksichtigt, so daß jetzt auch Schaltkreise im Subnanosekundenbereich der Serie K1500 zur Auswahl stehen und dokumentarisch belegt sind.

Das Handbuch schließt mit einigen Tafeln, die als Nachschlagehilfe beim Aufsuchen eines bestimmten Schaltkreistyps gedacht sind. Erfreulich ist, daß die internationale und nationale Nomenklatur verwendet wird.

G. Turingsky, Karl-Marx-Stadt EA 2744

Integrierte Schaltungen für Leistungsschalter und -regler Grundlagen und Anwendungsbeispiele

Von *Miklos Lambert*. Budapest: Akadémiai Kiadó 1987. 326 Seiten, 357 Bilder

Im Zuge der fortschreitenden technischen Entwicklung werden in weiten Bereichen der Automatisierungstechnik die konventionellen Mittel zum Schalten und Stellen elektrischer Energieströme durch moderne leistungselektronische Halbleiterbauelemente, wie Leistungstransistoren, Thyristoren und Triacs, ersetzt. Schritthaltend mit dieser Entwicklung wurden für die verhältnismäßig komplizierten Zündungssteuerungen der Thyristoren die integrierten Zündschaltkreise geschaffen. Sie werden in den Hauptabschnitten des vorliegenden Buches behandelt.

Zunächst werden die wichtigsten leistungselektronischen Halbleiterbauelemente bezüglich ihrer prinzipiellen Struktur, ihres Betriebsverhaltens sowie ihrer technischen Ausführung und der erzielbaren Leistungsparameter betrachtet und die verschiedenen Zündsteuerprinzipien erläutert. Daran anschließend werden die klassischen, mit diskreten Elementen aufgebauten Thyristor-Zündstromkreise erörtert und die monolitisch integrierten Thyristor-Zündschaltkreise behandelt. Dabei werden zunächst die funktionellen Komponenten der integrierten Schaltkreise für Phasenanschnittsteuerungen und für Nulldurchgangsschalter erklärt und dann insgesamt 60 Schaltkreise international bekannter Hersteller hinsichtlich ihres schaltungstechnischen Aufbaus, ihrer Betriebsdaten sowie ihrer funktionellen und ihrer anwendungsrelevanten Eigenschaften beschrieben.

In einem weiteren Hauptabschnitt werden sodann eine Vielzahl von Anwendungen der vorher betrachteten Schaltkreise behandelt. Dabei werden weit über hundert konkret dimensionierte Schaltungen und dazu in vielen Fällen das Leiterplattenlayout einschließlich der Leiterplattenbestückungspläne angegeben. Im einzelnen handelt es sich um phasenanschnittgesteuerte bzw. -geregelte Thyristorschaltungen für die Drehzahlregelung von Gleich- und Wechselstrommotoren u.a. Anwendungen, um mit Zündschaltkreisen aufgebaute statische Schalter, statische Nulldurchgangsschalter, Periodengruppensteuerungen, Zweipunkt-Periodengruppenregler, Proportional-Periodengruppenregler und andere spezielle Schaltungen mit Thyristorzündschaltkreisen.

Im letzten Abschnitt des Buches wird kurz auf die mit Thyristor- und Triacanwendungen verbundenen EMV-Probleme eingegangen. Insbesondere werden die von gesteuerten Leistungshalbleitern ausgehenden elektromagnetischen Störbeeinflussungen erläutert und Wege zu ihrer Unterdrückung aufgezeigt.

Das Buch ist eine nützliche Zusammenstellung der Eigenschaften und Anwendungen weltweit verfügbarer monolithisch integrierter Zündschaltkreise für steuerbare Halbleiterstromrichter. Das theoretische Anspruchsniveau ist niedrig, d.h., der Leser muß lediglich über einige elektrotechnische und elektronische Grundkenntnisse verfügen. Damit wird ein sehr breiter Personenkreis vom Amateur über den Elektronikfacharbeiter bis hin zum Entwickler von Rationalisierungsmitteln und Automatisierungsgeräten angesprochen. Auch Studierende an Hoch- und Fachschulen dürften in diesem Buch eine praktische Ergänzung zu den einschlägigen Fachlehrveranstaltungen finden.

E. Habiger, Dresden EA 2742

Wissensspeicher Mikrorechnerprogrammierung

Von *L. Claßen* und *U. Oefler*, Berlin: VEB Verlag Technik 1987. 200 Seiten, 33 Bilder, 50 Tafeln, Broschiert, 20,— M. Bestell-Nr. 553 6028

Der Band der neuen Fachbuchreihe „Technische Informatik" ist ein zusammenfassendes Nachschlagebuch mit hoher Informationsdichte.

Die Autoren wenden sich an den Leserkreis Programmierer, Mitarbeiter in Rechenzentren, Entwicklungsingenieure sowie an Studenten und Lehrkräfte, die sich mit den in der DDR gefertigten Mikroprozessorsystemen befassen.

In komprimierter Darstellung werden folgende Systeme bzw. Interpreter behandelt:

- 8-bit-Mikroprozessorsystem U 880
- 16-bit-Mikroprozessorsystem U 8000
- Einchip-Mikrorechner U 881/U 882-EMR
- Programmiersprache PLZ/ASM
- Programmentwicklungssystem UDOS
- U 880 BASIC-Interpreter
- U 883 TINY-M BASIC
- U 880 PASCAL-Interpreter.

In der ersten Hälfte des Bandes wird in umfassender Weise eine Systemübersicht über die Mikroprozessorsysteme der 8-bit- und 16-bit-Technik gegeben. Eine übersichtliche Gliederung ermöglicht ein schnelles Nachschlagen und Auffinden. Die Programmiermöglichkeiten der Mikroprozessor und Peripheriebausteine werden durch Grafiken, Befehlslisten und Programmiertabellen in einheitlicher Form dargestellt. Das ist für einen Programmierer, der in der Assemblersprache arbeitet, ein wichtiges Arbeitsmittel.

Im zweiten Teil des Bandes befassen sich die Autoren mit den höheren Programmiersprachen. Hierbei wird auf das Betriebssystem UDOS eingegangen, das für die K-1520-Rechner verfügbar ist, und das unter diesem Betriebssystem Entwicklungssoftware eines einheitlichen Konzepts für die Prozessoren der U 880- und U 8000-Familie auf der Basis der Sprache PLZ/ASM bis zu höheren Programmiersprachen existiert. Weiterhin sind die Programmiersprachen PLZ/ASM, BASIC und PASCAL in den Wissensspeichern in einer übersichtlicheren Form aufgenommen. Hieraus kann man eine Übersicht über diese Sprachen erhalten.

F. Hoppadietz, Berlin EA 2745

Documentation

Gesemann, R.; Gebhardt, G.; Stupin, P.

Testing and Application Problems of Ceramic Laminated Commutators. Part I

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 245–248, 7 Figs., 3 Tables, 4 Refs.

Ceramic laminated commutators are afapted to using in micromotors in S1-operation. The laminated system has to be adapted to the type of motor and is preselected by a motorett test. The adaption of the laminated system NiP/Au is proved by a motor test for d.c. micromotors. The application of the ceramic laminated commutator requires new mounting and connecting methods.

Gesemann, R.; Gebhardt, G.; Müller, F.; Stupin, P.

Testing and Application Problems of Ceramic Laminated Commutators. Part II

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 248–251, 7 Figs., 2 Tables, 3 Equations, 7 Refs.

Ceramic laminated commutators are also adapted to micromotors with uppermost requirements to the life. By using a wear-resistant operating lamina system with a PdNi-pseudo alloy a 2,7 fold life is reached, compared with conventional plastic commutators. Through a comparing motor test of more than 10000 hours the results are proved, secured statistically.

Hildebrand, N.; Lippschus, A.; Roseburg, D.

Remagnetization Losses of Magnetically Soft Cores in Medium Frequency

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 251–253, 7 Figs., 3 Tables, 4 Equations, 2 Refs.

The specific losses, measured by using an electronic vector voltmeter in medium frequency, for cutting strip core is given, existing of $Fe_{80}B_{14}Si_6$ and FeSi plate strip. The comparison of the measured values illustrates the loss reducing alternative solution of amorphous material in face of FeSi plate strip.

Küttner, H.

Further Development of the Low-Voltage Insulation Coordination by Considering a Statistical Examination Mode

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7. pp. 253–256, 2 Figs., 8 Refs.

This contribution deals with prerequisites, possibilities and advantages of a statistically aided low-voltage (NS) insulation coordination. The aim of the studies exists in reducing of uncertainties, still existing, in the hitherto used method corresponding to TGL 20445/03 and in deducing consequences for the overvoltage protection.

Buchholz, B.; Kreuzer, E.; Mahnert, M.; Thämelt, G.; Tscheschner, Chr.

Methods of Reliability Safeguarding of Integrated Microelectronic Conducting System for VUW 110 kV

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 256–260, 2 Figs., 1 Table, 4 Refs.

At the Institut für Energieversorgung the type solution microelectronic conducting techniques for VUW 110 kV was developed. In this solution close and long-range tasks (controlling, supervising, measuring), automating functions as well as diagnosis and testing tasks are integrated in a partially redundant multiple-computer system. For this system conception statements about the reliability safeguarding measures are made, and conclusions to the reliability of the total system are derived.

Bär, G.; Weber, G.

Qualimetric Property Evaluation of Precious Metal Contact Materials and Semi-Finished Products for Weak Current Applications. Part 2

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 260–263, 1 Fig., 1 Table, 15 Equations, 6 Refs.

The represented qualimetric property evaluating (QEB) method was developed with consideration of the ASMW-VW 1486, and it corresponds in its bottom flues to the evaluating method „accomplishing degree" of the Institut für Leichtbau of Dresden. Aspects of the qualimetric security evaluation were also considered.

Dobrogowski, J.; Kolaczkowski, Z.; Nawrowski, R.; Rybski, A.

To the Polarity Effect of the Electrodes in Short Air and Vacuum Distances with Non-Uniform Field Distribution

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 264–266, 6 Figs., 10 Equations

In this contribution the polarity effect of the electrodes in the system „point-plate" is tested both in air and in vacuum. Furthermore, the distribution of the electric field and its connection with the sparking voltage in the selected system is determined.

Blumschein, E.

Terms Corresponding to Duality for the Powerelectronics

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 267–270, 6 Figs., 2 Tables, 7 Refs.

Conventional terms, as commutating and quenching, don't correspond to the existence of dual circuits. The study of some duality relations leads to recommendations for new terms.

Kaczmarek, T.; Deskur, J.

Regulating a Current Inverter Motor at the Inverter Step Threshould

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, pp. 270–274, 9 Figs., 9 Equations, 2 Refs.

In this contribution the regulating system of a current inverter motor is described, working at the inverter step threshould. By means of the analysis new terms of the commutating reserve are introduced. The proposed compensating and regulating structures are tested by means of the analogous simulation techniques. It could be stated, that besides the regulating and compensating loops overexcitation and force of the rated value signal of the commutating reserve are necessary for protecting the inverter against turning down in the whole speed range.

Документация

Геземан, Р.; Гебхардт, Г.; Ступин, П.

Опытная эксплуатация и проблемы применения керамических слоистых коммутаторов I

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 245–248, 7 рис., 3 табл., 4 лит.

Керамические слоистые коммутаторы пригодны для применения в миниатюрных двигателях, работающих в режиме S1. Система слоев должна выбираться в соответствии с типом двигателя и предопределяется по ерзультатам теста миндвигателя (Motorettentest). Пригодность системы слоев рабочей поверхности NiP/Au доказывается путем проведения теста для миниатюрных двигателей постоянного тока. Применение керамического слоистого коммутатора требует применения новых методов монтажа и соединения.

Геземан, Р.; Гебхардт, Г.; Мюллер, Ф.; Ступин, П.

Опытная эксплуатация и проблемы применения керамических слоистых коммутаторов II

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 248–251, 7 рис., 2 табл., 3 уравн., 7 лит.

Керамические слоистые коммутаторы пригодны также для микродвигателей при предъявлении наивысших требований к сроку службы. Благодаря применению износостойкой системы слоев рабочей поверхности из псевдосплава PdNi добивается повышенный в 2,7 раз срок службы по сравнению с существующими пластмассовыми коммутаторами. На основе проведения сравнительного теста двигателей продолжительностью 10000 часов доказывается статистическая достоверность полученных результатов.

Хильдебрандт, Н.; Липшус, А.; Розебург, Д.

Потери на перемагничивание мягкомагнитных сердечников на средней частоте

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 251–253, 7 рис., 3 табл., 4 уравн., 2 лит.

Указываются удельные потери для ленточного разрезного сердечника из ленточной жести $Fe_{80}B_{14}Si_6$ и FeSi, определяемые при помощи электронного векторного вольтметра. Сопоставление измеряемых значений показывает снижающее потери альтернативное решение применения аморфного материала по сравнению с жестью FeSi.

Кюттнер, Х.

Совершенствование координации низковольтной изоляции путем внедрения статистического метода оценки

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 253–256, 2 рис., 8 лит.

В статье рассматриваются условия, возможности и преимущества статистически обоснованной координации низковольтной изоляции. Целью исследования является сокращение существующих до сих пор неуверенностей в сегодняшнем подходе в соответствии с ТГЛ 20445/03 и вывод последствий для защиты от перенапряжений.

Бухгольц, Б.; Кройцер, Э.; Манерт, М.; Тэмельт, Г.; Чершнер, Хр.

Методы обеспечения надежности интегральных микроэлектронных систем управления распределительными трансформаторными подстанциями 110 кВ

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 256–260, 2 рис., 1 табл., 4 лит.

В институте энергоснабжения разработано типовое решение микроэлектронной аппаратуры управления распределительными трансформаторными подстанциями 110 кВ. В данном решении интегрированы в частично избыточной многомашинной системе задания ближнего и дистанционного действия (управление, контроль, измерение), функции автоматизации, а также задания диагностики и испытания. Для данной системной концепции приводятся заключения по мероприятиям обеспечивающим надежность и выводятся заключения о надежности общей системы.

Бэр, Г.; Вебер, Г.

Квалиметрическая оценка свойств контактных материалов и заготовок из благородных металлов для применения в слаботочной технике — часть 2

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 260–263, 1 рис., 1 табл., 15 уравн., 6 лит.

Представленная методика квалиметрической оценки свойств разработана с учетом нормативного документа ASMW-VW 1486 и в основных чертах соответствует методу оценки „степень выполнения" института легкого строительства г. Дрездена. Учтены также и аспекты квалиметрической оценки надежности в электроэнергетической технике.

Доброговски, Й.; Колацковски, З.; Навровски, Р.; Рыбски, А.

Об эффекте полярности электродов в коротких воздушных и вакуумных промежутках с неравномерным распределением поля

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 264–266, 6 рис., 10 уравн.

В статье проверяется эффект полярности электродов в системе „острие-плоскость" как в воздухе, так и во вакууме. Кроме того, определяется распределение поля и взаимосвязь его с пробивным напряжением во выбранной системе.

Блумшайн, Э.

Понятия мощной электроники, отвечающие явлению двойственности

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 267–270, 2 табл., 7 лит.

Традиционные понятия, как коммутирование и гашение не удовлетворяют существованию двоичных схем. Исследование некоторых взаимоотношений двойственности привело к рекомендации применения новых понятий.

Качмарек, Т.; Дескур, Й.

Регулировка вентильного двигателя на пределе синхронизма инвертора

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 7, стр. 270–274, 9 рис., 9 уравн., 2 лит.

В статье описывается система управления вентильным двигателем, работающая на пределе синхронизма инвертора. На основе проведенного анализа вводятся новые понятия коммутационного запаса. Предложенные компенсационные и регулировочные структуры проверены с помощью техники аналогового моделирования. Показалось, что для защиты инвертора от опрокидывания во всем диапазоне скорости, помимо регулировочной и компенсационной петли требуется еще перевозбуждение и форсировка сигнала заданного значения коммутационного запаса.

Gesemann, R.; Gebhardt, G.; Stupin, P.

Erprobung und Einsatzprobleme bei Keramikschichtkommutatoren. Teil 1

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 245 – 248, 7 Bilder, 3 Tafeln, 4 Lit.

Keramikschichtkommutatoren eignen sich für die Anwendung in Kleinstmotoren im S1-Betrieb. Das Schichtsystem ist dem Motortyp anzupassen und wird mit einem Motorettentest vorausgewählt.
Die Eignung des Laufschichtsystems NiP/Au wird in einem Motortest für Gleichstrom-Kleinstmotoren nachgewiesen. Die Anwendung des Keramikschichtkommutators erfordert neue Montage- und Verbindungsverfahren.

Gesemann, R.; Gebhardt, G.; Müller, F.; Stupin, P.

Erprobung und Einsatzprobleme bei Keramikschichtkommutatoren. Teil 2

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 248 – 251, 7 Bilder, 2 Tafeln, 3 Gln., 7 Lit.

Keramikschichtkommutatoren eignen sich ebenfalls für Mikromotoren bei höchsten Ansprüchen an die Lebensdauer. Durch ein verschleißfestes Laufschichtsystem mit einer PdNi-Pseudolegierung wird eine 2,7fache Lebensdauer gegenüber herkömmlichen Plastkommutatoren erzielt. Durch einen vergleichenden Motortest über 10000 h werden die Ergebnisse statistisch gesichert nachgewiesen.

Hildebrand, N.; Lippschus, A.; Roseburg, D.

Ummagnetisierungsverluste weichmagnetischer Kerne bei Mittelfrequenz

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 251 – 253, 7 Bilder, 3 Tafeln, 4 Gln., 2 Lit.

Es werden die mit einem elektronischen Vektorvoltmeter bei Mittelfrequenz ermittelten spezifischen Verluste für Schnittbandkern aus $Fe_{80}B_{14}Si_6$- und FeSi-Blechband angegeben. Die Gegenüberstellung der Meßwerte verdeutlicht die verlustsenkende Alternativlösung von amorphem Material gegenüber FeSi-Blech.

Küttner, H.

Weiterentwicklung der Niederspannungs-Isolationskoordination durch Einbeziehung einer statistischen Betrachtungsweise

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 253 – 256, 2 Bilder, 8 Lit.

Der Beitrag behandelt Voraussetzungen, Möglichkeiten und Vorteile einer statistisch gestützten NS-Isolationskoordination. Ziel der Untersuchungen ist der Abbau noch bestehender Unsicherheiten beim derzeitigen Vorgehen nach TGL 20445/03 und die Ableitung von Konsequenzen für den Überspannungsschutz.

Buchholz, B.; Kreuzer, E.; Mahnert, H.; Thämelt, G.; Tscheschner, Chr.

Methoden der Zuverlässigkeitssicherung integrierter mikroelektronischer Leitsysteme für VUW 110 kV

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 256 – 260, 2 Bilder, 1 Tafel, 4 Lit.

Am Institut für Energieversorgung wurde die Typlösung mikroelektronische Leittechnik für VUW 110 kV entwickelt. In dieser Lösung werden Nah- und Fernwirkaufgaben (Steuern, Überwachen, Messen), Automatisierungsfunktionen sowie Diagnostik und Prüfaufgaben in ein teilredundantes Mehrrechnersystem integriert. Es werden für diese Systemkonzeption Aussagen zu den zuverlässigkeitssichernden Maßnahmen getroffen und Schlußfolgerungen zur Zuverlässigkeit des Gesamtsystems abgeleitet.

Bär, G.; Weber, G.

Qualimetrische Eigenschaftsbewertung von Edelmetall-Kontaktwerkstoffen und -Halbzeugen für Schwachstromanwendungen. Teil 2

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 260 – 263, 1 Bild, 1 Tafel, 15 Gln., 6 Lit.

Die vorgestellte QEB-Methodik wurde unter Berücksichtigung der ASMW-VW 1486 entwickelt und entspricht in ihren Grundzügen der Bewertungsmethode „Erfüllungsgrad" des Instituts für Leichtbau Dresden. Gesichtspunkte der qualimetrischen Sicherheitsbewertung in der Elektroenergietechnik wurden ebenfalls beachtet.

Dobrogowski, J.; Kolaczkowski, Z.; Nawrowski, R.; Rybski, A.

Zum Polaritätseffekt der Elektroden in kurzen Luft- und Vakuumstrecken mit ungleichförmiger Feldverteilung

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 264 – 266, 6 Bilder, 10 Gln.

Im Beitrag wird der Polaritätseffekt der Elektroden im System „Spitze – Platte" sowohl in Luft als auch im Vakuum überprüft. Außerdem wird die Verteilung des elektrischen Feldes und dessen Zusammenhang mit der Überschlagspannung im gewählten System bestimmt.

Blumschein, E.

Dualitätsgerechte Begriffe für die Leistungselektronik

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 267 – 270, 6 Bilder, 2 Tafeln, 7 Lit.

Traditionelle Begriffe, wie Kommutierung und Löschung, werden der Existenz dualer Schaltungen nicht gerecht. Die Untersuchung einiger Dualitätsbeziehungen führte zu Empfehlungen für neue Begriffe.

Kaczmarek, T.; Deskur, J.

Regelung eines Stromrichtermotors an der Wechselrichtertrittgrenze

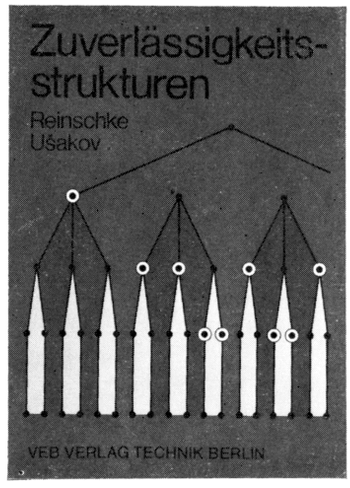
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 7, S. 270 – 274, 9 Bilder, 9 Gln., 2 Lit.

Im Beitrag wird das Steuerungssystem eines Stromrichtermotors, das an der Wechselrichtertrittgrenze arbeitet, beschrieben. Anhand der Analyse werden neue Begriffe für die Kommutierungsreserve eingeführt. Die vorgeschlagenen Kompensations- und Regelstrukturen wurden mit Hilfe der analogen Simulationstechnik nachgeprüft. Es hat sich gezeigt, daß außer der Regel- und Kompensationsschleife noch Übererregung und Forcierung des Sollwertsignals der Kommutierungsreserve nötig sind, um den Wechselrichter vor dem Kippen im ganzen Drehzahlbereich zu schützen.

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik Oranienburger Str. 13/14, Berlin, DDR, 1020 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 2870; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345) Ing. *Günther Barth*, Redakteur (Telefon 2870343)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, Bereich Borsdorf Borsdorf, 7122
Gestalter	*Eckardt Natorp* (Telefon 2870287)
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, Berlin, 1020 PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR, 1157
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11 a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ústřédni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 12000 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače Praha, Posta 022, 88547 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzéće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scinteii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Ha Noi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141 – 167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Leipzig, DDR, 7010, Postfach 160 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR, 7010

Zuverlässigkeitsstrukturen

Modellbildung · Modellauswertung



Von Dr.-Ing. habil. Dr. rer. nat. K. Reinschke und Prof. Dr. sc. techn. I. A. Ušakov
239 Seiten, 95 Bilder, 14 Tafeln, Leinen, DDR 33,— M, Ausland 38,— DM.
Bestellangaben: 5537282/Reinschke, Zuverlässig

Mit wachsender Größe und komplizierterem Aufbau der Systeme wird es immer schwieriger, die erforderlichen Zuverlässigkeitsparameter zu gewährleisten. Die in der Praxis auftretenden Zuverlässigkeitsprobleme haben die Schaffung wissenschaftlich begründeter Methoden erzwungen.
Im Gegensatz zu den bisher recht zahlreich erschienenen Büchern über Zuverlässigkeitsmathematik wird in diesem Werk nicht von gegebenen Zuverlässigkeitsmodellen ausgegangen. Die Autoren konzentrieren sich vielmehr auf die Modellbildung, um die Zuverlässigkeitsstruktur eines Systems sichtbar zu machen. Dazu werden Graphen als das entscheidende Darstellungsmittel benutzt. Die Methoden sind sowohl auf technische als auch auf nichttechnische Systeme anwendbar.
Das Buch ist in erster Linie für Ingenieure, Ökonomen und Naturwissenschaftler gedacht, die die Zuverlässigkeitstheorie anwenden möchten. Aber auch Zuverlässigkeitsspezialisten werden hier manches Neue finden; besonders seien hier genannt die Berücksichtigung der zeitlichen Reihenfolge der Elementeausfälle im Rahmen der Booleschen Theorie und die mehrwertigen monotonen Zuverlässigkeitsmodelle.
Die Darstellung ist weitgehend elementar, es werden keine Vorkenntnisse über Zuverlässigkeitstheorie vorausgesetzt.

Aus dem Inhalt des Buches:

Zuverlässigkeit netzartig strukturierter Systeme
Modellbildung. Zweiterminale Kommunikationsnetze und ihre Boolesche Systemfunktion. Leistungsbewertungen für zweiterminale Kommunikationsnetze. Multiterminale Kommunikationsnetze

Zuverlässigkeitsstrukturen für beliebig aufgebaute Systeme
Vorgehensweisen zur systematischen Ermittlung von Zuverlässigkeitsmodellen. Zweiterminale Zuverlässigkeitsnetze und Fehlerbäume. Aufstellen von Fehlerbäumen. Berechnung von Booleschen Systemfunktionen und Zuverlässigkeitskenngrößen. Berücksichtigung der zeitlichen Reihenfolge der Elementeausfälle. Mehrwertige monotone Zuverlässigkeitsmodelle

Beschreibung des Prozeßverhaltens mit Hilfe von Graphen
Übergangsgraphen und Differentialgleichungssysteme für die Zustandswahrscheinlichkeiten. Prozesse mit Regenerationszeitpunkten. Rückführung auf homogene Markovsche Prozesse mit stetigem Parameterbereich. Prozesse ohne Regenerationszeitpunkte.

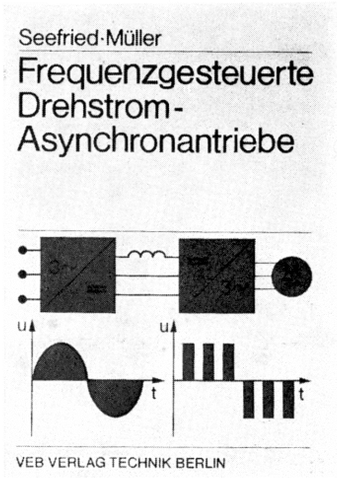
Auslieferung durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

ISSN 0013—5399
ELEKTRIE · Berlin 42 (1988) 7 · S. 241—2

6730 7 127 027 465
KOMB KERAM WERKE
8612 2001 0136 RF 1

Neuerscheinung



Von Prof. Dr. sc. techn. Eberhard Seefried und Prof. Dr.-Ing. habil. Germar Müller
195 Seiten, 129 Bilder, 18 Tafeln, Pappband, DDR 26,— M, Ausland 32,— DM.
Bestellangaben: 5537258/Seefried, Asynchronantrieb

Auslieferung durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Mit der raschen Entwicklung der Mikroelektronik und der Mikrorechentechnik ergeben sich auch im Bereich der energetischen Elektrotechnik neuartige Lösungsmöglichkeiten. So haben zum Beispiel in den letzten Jahren frequenzgesteuerte Drehstromantriebe zunehmend an Bedeutung gewonnen. Das vorliegende Buch behandelt dieses Gebiet in sechs Abschnitten:

- Allgemeine Beschreibung des Betriebsverhaltens der Dreiphasenasynchronmaschine
- Verhalten der Asynchronmaschine bei Stromrichterspeisung
- Die Asynchronmaschine als Regelstrecke
- Entwurf und Dimensionierung leistungselektronischer Stellglieder
- Signalverarbeitung in Umrichtern
- Analoge und digitale Regelung.

Ausgehend vom allgemeinen Gleichungssystem zur Analyse des Betriebsverhaltens werden Besonderheiten bei Umrichterspeisung der Asynchronmaschine herausgestellt. Das regelungstechnische Verhalten wird über die Zustandsbeschreibung der Maschine abgeleitet. Bei der Behandlung der Stellglieder finden neuere Entwicklungen von Bauelementen (GTO-Thyristoren, Leistungstransistoren) Berücksichtigung. An die Betrachtung der Systemelemente schließen sich Erörterungen des kompletten Antriebssystems an. Verschiedene Regelungskonzepte werden vorgestellt. Dabei bieten Variantenvergleiche dem Leser wichtige Entscheidungshilfen. Durch Einfügen von praktischen Details, numerischen Beispielen, Angabe erreichbarer Parameter, Aufwandsbetrachtungen und gerätetechnische Anlagen werden die theoretischen Grundlagen anwenderfreundlich aufbereitet. Ein umfangreiches Literaturverzeichnis ermöglicht ein weiteres Eindringen in die Materie.

Das Buch wendet sich in erster Linie an die in der Praxis tätigen Ingenieure, die derartige Antriebssysteme entwickeln, produzieren oder betreiben. Darüber hinaus kann die Schrift auch Studenten elektrotechnischer Fachrichtungen zum Vertiefen der Kenntnisse auf dem Gebiet der automatisierten Elektrotechnik empfohlen werden.